

Grado Universitario en Ingeniería en  
Tecnologías Industriales  
2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

# **“Modelización y simulación de un sistema vial real”**

---

David Piñero Weger

Tutora

Isabel García Gutiérrez

Leganés, 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

La presente memoria recoge el proceso detallado del estudio de simulación de un sistema vial con problemas de tráfico lento.

En dicho estudio se ha recogido toda la información necesaria a partir del sistema para poder hacer una traducción de la realidad a un modelo mediante una herramienta informática. Sobre el modelo se ha podido experimentar y obtener información cuantitativa acerca de las hipótesis realizadas de posibles cambios a producir en el sistema que mejorasen el flujo vial.

En función de los resultados obtenidos y de las características de cada uno de estos cambios se han obtenido conclusiones respecto a lo beneficioso que puede resultar la implementación de cada uno de ellos en la realidad.

**Palabras clave:** simulación, modelado, paquetes de software, estadística.

## **ABSTRACT**

This paper contains the detailed process carried out during the simulation study of a road system with slow traffic problems.

In said study all the necessary information was obtained from the system in order to translate reality into a model using a computer program. With this model it was possible to experiment and to acquire quantitative information regarding previous hypothesis developed, concerning possible changes to the road system that could enable better traffic flow.

As a consequence of the results obtained and the differing characteristics of the proposed solutions, conclusions have been drawn in regard to possible benefits obtained by implementing each one of them in the real system.

**Key words:** simulation, modeling, software packages, statistics.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1.-INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1-Motivación.....	2
1.2.- Objetivos .....	4
1.3.-Estructura de la memoria .....	4
<b>2.- SIMULACIÓN DE SISTEMAS DISCRETOS. ENTORNO DE SIMULACIÓN WITNESS. ....</b>	<b>6</b>
2.1.- Simulación.....	6
2.1.1.- Etapas de la simulación.....	7
2.2.- Softwares de simulación .....	11
2.2.1.- Ventajas y desventajas del software de simulación .....	11
2.2.2.- Clasificación del software de simulación .....	12
2.2.3.- Características deseables de un software de simulación. ....	13
2.3.- Herramienta de simulación Witness.....	14
2.3.1.- Elementos en Witness .....	14
2.3.2.- Gestión de elementos. ....	16
<b>3.- SISTEMA REAL.....</b>	<b>17</b>
3.1.- Descripción del sistema real .....	17
3.2.- Desarrollo del flujo y periodos de interés.....	26
<b>4.- MODELO .....</b>	<b>28</b>
4.1.- Alternativas de mejora. ....	28
4.2.- Modelo Conceptual.....	31
4.2.1.- Principales simplificaciones iniciales.....	32
4.2.2.- Proceso de modelización e iteraciones.....	33
4.2.3.- Variables aleatorias de entrada. ....	37
4.2.4.- Variables de salida. ....	38
4.3.- Recogida de datos y alimentación del modelo .....	38
4.3.1.- Metodología moderna de recogida de datos en sistemas viales.....	39
4.3.2.- Metodología llevada a cabo y limitaciones.....	40
4.3.3.- Ajuste de datos a distribuciones de probabilidad.....	41
4.3.3.1.- Selección de datos IID .....	41
4.3.3.2.- Hipótesis sobre la posible distribución. ....	45
4.3.3.3.- Prueba $\chi^2$ .....	49
4.4.- Programación en Witness.....	51
4.5.- Verificación. ....	58
4.6.- Experimentación, análisis de resultados y validación del modelo básico. ....	59
<b>5.- ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE MEJORA .....</b>	<b>65</b>
5.1.- Definición e implementación de las alternativas. ....	65
5.2.- Resultados y comparación con el modelo base. ....	66

<b>6.- VALORACIÓN ECONÓMICA .....</b>	<b>77</b>
6.1.- <i>Costes del proyecto.....</i>	77
6.2.- <i>Costes de implementación de las alternativas. ....</i>	78
<b>7.-CONCLUSIONES.....</b>	<b>80</b>
<b>8.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>
<b>9.- ANEXOS .....</b>	<b>84</b>





## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. TIEMPOS DE LOS SEMÁFOROS EE1 Y EE2 .....	24
TABLA 3.2. TIEMPOS DE LOS SEMÁFOROS A, B, C Y D .....	26
TABLA 4.1. OPCIONES POSIBLES EN CADA PUNTO DE TOMA DE DECISIÓN .....	36
TABLA 4.2. CONTEO DE COCHES PARA “Dist_SALIDA_ROT D” .....	41
TABLA 4.3. $\chi^2$ EXPERIMENTAL DE Ee1 .....	51
TABLA 4.4. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON MODELO BÁSICO .....	62
TABLA 4.5. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DEL MODELO BÁSICO .....	63
TABLA 5.1. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA PRIMERA ALTERNATIVA .....	68
TABLA 5.2. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA PRIMERA ALTERNATIVA.....	68
TABLA 5.3. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA SEGUNDA ALTERNATIVA.....	69
TABLA 5.4 CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA SEGUNDA ALTERNATIVA.....	69
TABLA 5.5. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA TERCERA ALTERNATIVA .....	70
TABLA 5.6. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA TERCERA ALTERNATIVA.....	70
TABLA 5.7. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA CUARTA ALTERNATIVA.....	71
TABLA 5.8. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA CUARTA ALTERNATIVA.....	71
TABLA 5.9. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA QUINTA ALTERNATIVA .....	72
TABLA 5.10. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA QUINTA ALTERNATIVA.....	72
TABLA 5.11. VARIABLES DE DIFERENCIA ENTRE MODELO BASE Y ALTERNATIVAS.....	74
TABLA 5.12. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LAS VARIABLES DE DIFERENCIA.....	75
TABLA 6.1. COSTES.....	78
TABLA A.1 .....	84
TABLA A.2 .....	85

TABLA A.3 .....	85
TABLA A.4 .....	86
TABLA A.5 .....	87
TABLA A.6 .....	87
tABLA A.7 .....	88
TABLA B.1.....	89
TABLA B.2.....	89
TABLA B.3.....	89
TABLA B.4.....	89
TABLA B.5.....	89
TABLA B.6.....	90
TABLA B.7.....	90
TABLA B.8.....	90
TABLA B.9.....	90



# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Matriculaciones de vehículos nuevos en España. Fuente: [2] .....	2
Fig. 1.2 Víctimas de accidentes de tráfico en España desde 1960. Fuente: [4] .....	3
Fig. 2.1. Maneras de estudiar un sistema. Fuente: [7] .....	7
Fig. 2.2. Etapas de la simulación. Fuente: [9] .....	8
Fig. 3.1. Evolución de la población de Rivas en los últimos años. Fuente [13] .....	17
Fig. 3.2. Número de habitantes en Rivas por edades y género. Fuente: [13].....	18
Fig. 3.3. Mapa de la Avenida los Almendros.....	18
Fig. 3.4. Turbo rotonda. Fuente: [15].....	19
Fig. 3.5. Ronda del sistema.....	20
Fig. 3.6. Ronda del sistema.....	20
Fig. 3.7. Esquematización del flujo de vehículos en la rotonda. Fuente: [16] .....	22
Fig. 3.8. Región de estudio del sistema y nomenclatura. ....	23
Fig. 3.9. Pulsador en un semáforo de pulsar. ....	24
Fig. 3.10. Esquematización del funcionamiento de los semáforos de pulsar del sistema real.....	25
Fig. 3.11. Situación en la que los vehículos que entran por C en la rotonda pueden avanzar de frente. ....	27
Fig. 4.1 Lugar donde se construiría la carretera auxiliar.....	29
Fig. 4.2. Zona de parque que se sustituiría por la carretera auxiliar. ....	30
Fig. 4.3. Pasarela para peatones. ....	30
Fig. 4.4. Zona en la que se construiría la pasarela para peatones. ....	31
Fig. 4.5. Longitud de un coche aleatorio.....	32
Fig. 4.6. Esquema del modelo durante el proceso de modelización. ....	35
Fig. 4.7. Espiras magnéticas. [17].....	39
Fig. 4.8. Sensor por microondas. [17] .....	39
Fig. 4.9. Cámaras IP. [17] .....	40

Fig. 4.10. Valor medio de la variable de salida frente al tiempo en un sistema con régimen permanente. Fuente: [9].....	41
Fig. 4.11. Valor medio de la variable de salida frente al tiempo en un sistema sin régimen permanente. Fuente: [9].....	42
Fig. 4.12. Intervalos entre llegadas de la variable aleatoria Pa sin hacer selección de datos. ....	42
Fig. 4.13. Intervalos entre llegadas de la variable aleatoria Pa con datos seleccionados. ....	43
Fig. 4.13. Diferencias en los gráficos de dispersión entre datos independientes y correlacionados. Fuente: [9] .....	43
Fig. 4.14. Test de independencia para la variable aleatoria de intervalos entre llegadas por Ae1. ....	44
Fig. 4.14. Test de independencia para la variable aleatoria de intervalos entre llegadas por Pc.....	44
Fig. 4.15. Histograma obtenido a partir de los datos de la variable de intervalos entre llegadas por Ae1. ....	45
Fig. 4.16. Histograma obtenido a partir de los datos de la variable de intervalos entre llegadas por Ee1. ....	46
Fig. 4.17. Distribución exponencial.....	46
Fig. 4.18. Histograma obtenido a partir de los datos de la variable de intervalos entre llegadas por Be. ....	47
Fig. 4.19. Distribuciones Weibull. Fuente: [9].....	48
Fig. 4.20. Imagen del display del programa sin ejecutar. ....	52
Fig. 4.21. Ejemplo de regla de salida de una cinta transportadora en un semáforo. ....	53
Fig. 4.22. Imagen del display de las vías vacías.....	53
Fig. 4.23. Ejemplo de código utilizado para regular la velocidad a la entrada de una vía. ....	54
Fig. 4.24. Display de la cinta transportadora previa a la rotonda “conv_aux01”. ....	54
Fig. 4.25. Regla de salida de la cinta transportadora “conv_aux01”. ....	54
Fig. 4.26. Código de programación de la parte “FICTICIA_A”. ....	56
Fig. 4.27. Regla de salida para la cinta transportadora “Ae1_1”. ....	56
Fig. 4.28. Display de una parte representativa de un vehículo.....	57
Fig. 4.29. Display de una parte representativa de un peatón.....	57
Fig. 4.30. Display del modelo durante una simulación. ....	57
Fig. 4.31. Regiones de aceptación y rechazo de una distribución t para un $\alpha=0,05$ .....	60
Fig. 5.1. Programación de la primera alternativa en Witness.....	65
Fig. C.1. Estacionalidad de datos de Ae2. ....	91

Fig. C.2. Estacionalidad de datos de Ae1. ....	91
Fig. C.3. Estacionalidad de datos de Be. ....	92
Fig. C.4. Estacionalidad de datos de De. ....	92
Fig. C.5. Estacionalidad de datos de Pd. ....	93
Fig. C.6. Estacionalidad de datos de Pb. ....	93
Fig. C.7. Estacionalidad de datos de Pc. ....	94
Fig. C.8. Estacionalidad de datos de Pa. ....	94
Fig. C.9. Estacionalidad de datos de Ee1. ....	95
Fig. C.10. Estacionalidad de datos de Ee2. ....	95
Fig. C.11. Gráfico de dispersión para datos de Ae1. ....	96
Fig. C.12. Gráfico de dispersión para datos de Ae2. ....	96
Fig. C.13. Gráfico de dispersión para datos de Ee1. ....	97
Fig. C.14. Gráfico de dispersión para datos de Ee2. ....	97
Fig. C.15. Gráfico de dispersión para datos de Be. ....	98
Fig. C.16. Gráfico de dispersión para datos de Pb. ....	98
Fig. C.17. Gráfico de dispersión para datos de De. ....	99
Fig. C.18. Gráfico de dispersión para datos de Pa. ....	99
Fig. C.19. Gráfico de dispersión para datos de Pd. ....	100
Fig. C.20. Gráfico de dispersión para datos de Pc. ....	100
Fig. D.1. Histogramas de Ae1 y Ae2. ....	101
Fig. D.2. Histogramas de Ee1 y Be. ....	102
Fig. D.3. Histogramas de De y Pa. ....	103
Fig. D.4. Histogramas de Pc y Pd. ....	104
Fig. D.5. Histogramas de Pb y Ee2. ....	105
Fig. E.1. Test $\chi^2$ de Ae1. ....	106
Fig. E.2. Test $\chi^2$ de Ae12 y Ee1. ....	107
Fig. E.3. Test $\chi^2$ de Be. ....	107

Fig. E.4. Test $\chi^2$ de De y Pa. ....	108
Fig. E.5. Test $\chi^2$ de Pc y Ee2. ....	108
Fig. E.6. Test $\chi^2$ de Be. ....	109
Fig. E.7. Test $\chi^2$ de Be. ....	109





# 1.-INTRODUCCIÓN

## 1.1-Motivación

A lo largo de las últimas décadas se ha producido un crecimiento notorio en el número de vehículos que circulan en España. A partir de 2008, los años de crisis frenaron el crecimiento en el número de matriculaciones de vehículos nuevos que llevaba produciéndose desde los noventa, sin embargo, en los últimos años, se ha restablecido la situación anterior acorde a la mejora de la situación económica en el país. Las matriculaciones de vehículos en nuestro país en el mes de agosto de 2018 se vieron incrementadas en un 48.7% con respecto al mes de agosto de 2017. [1]

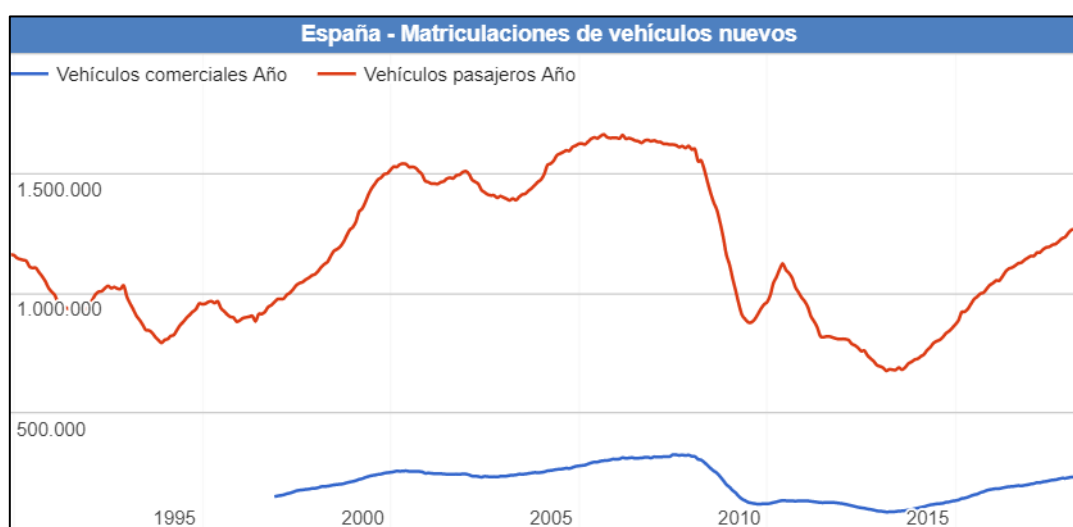


Fig. 1.1. Matriculaciones de vehículos nuevos en España. Fuente: [2]

Este crecimiento del uso del vehículo particular se ha convertido en un verdadero problema para las zonas urbanas, dado que el mayor tránsito vial se traduce en mayores atascos, más accidentes y en problemas medioambientales que merman la calidad de vida de los habitantes.

Para el conjunto de empresas españolas, las pérdidas de dinero causadas por los atascos son de 840 millones de euros al año (según datos del 2016) y las muertes producidas por la contaminación atmosférica al año en España se elevan a 31.520 según la Agencia Europea del Medio Ambiente. [3]

Por otro lado, el número de víctimas en los accidentes de tráfico refleja una clara tendencia ascendente en las últimas décadas, como se puede ver en la figura 1.2:

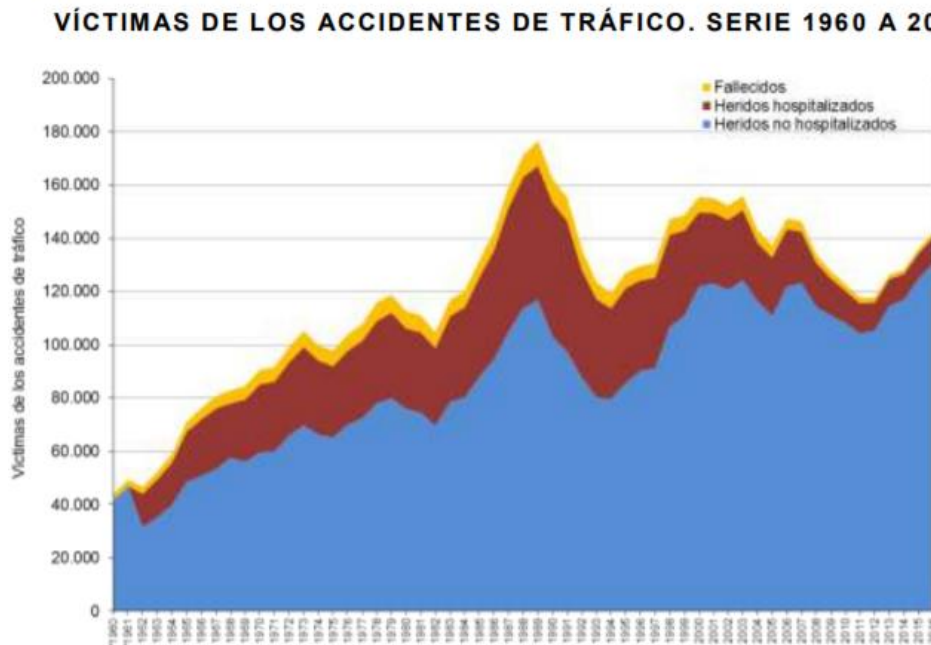


Fig. 1.2 Víctimas de accidentes de tráfico en España desde 1960. Fuente: [4]

La respuesta a estos problemas se encuentra en garantizar que el tráfico transcurra con fluidez, y la mejor forma de lograrlo es a través de una correcta gestión y planificación del tráfico. Aquí es donde cobra importancia la Ingeniería del tráfico o del tránsito, una rama de la ingeniería que tiene como objetivos garantizar que la circulación de personas y mercancías se produzca de forma eficaz, rápida y segura mediante el adecuado diseño de los sistemas de tráfico y las infraestructuras. La ingeniería del tráfico ha sufrido un verdadero crecimiento en cuanto a demanda y complejidad, con lo que los estudios de optimización de sistemas viales han ido adquiriendo cada vez más importancia tanto en entornos universitarios como por parte de las administraciones públicas. [5]

Dado que no es posible en la mayoría de los casos validar estrategias de control o de mejora de estos sistemas mediante su implementación directa, han ganado gran peso en este sector los estudios de simulación, que permiten generar conclusiones inalcanzables de ninguna otra manera.

## 1.2.- Objetivos

El objetivo de este proyecto es el de obtener soluciones de mejora del flujo de tráfico en un sistema vial concreto. Para ello, se realizará un estudio de simulación del sistema en cuestión en el que el diseño de un modelo de simulación permitirá dar validez o rechazar las hipótesis sobre las posibles alternativas de mejora que se hayan planteado previamente.

Con la mejora del flujo del tráfico, se busca reducir los tiempos de demora que sufren los usuarios de las vías del sistema diariamente, reducir la probabilidad de que se produzcan accidentes y disminuir las cantidades de gases nocivos para la atmósfera que se emiten en la zona debido a los frecuentes atascos.

En definitiva, se busca obtener una teórica posibilidad de mejora del sistema (o varias) cuya implantación mejorase el ecosistema urbano donde se encuentra.

## 1.3.-Estructura de la memoria

El presente proyecto cuenta con los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1. Introducción:** incluye la motivación, los objetivos y la presente estructura de la memoria del proyecto.
- **Capítulo 2. Simulación de sistemas discretos. Entorno de simulación Witness:** en este capítulo se hace un acercamiento al por qué de la simulación y se exponen sus etapas. También se plantea una discusión sobre las diversas posibilidades en cuanto a software de simulación que existen en el mercado y se revelan los aspectos más importantes del software elegido.
- **Capítulo 3. Sistema Real:** contiene toda la información detallada acerca del sistema que se estudia y sobre el que se realiza la simulación.
- **Capítulo 4. Modelo:** repasa lo llevado a cabo durante todo el proceso de modelización, desde su conceptualización hasta su programación y validación.
- **Capítulo 5. Análisis de alternativas de mejora:** capítulo en el cual se analizan las distintas alternativas que se proponen para mejorar la situación en el sistema y en el que se exponen los cálculos y resultados obtenidos a raíz de cada alternativa.
- **Capítulo 6. Valoración económica:** donde se plantean los costes de realización del estudio de simulación y los costes asociados a la implementación de cada alternativa.

- **Capítulo 7. Conclusiones:** se exponen las conclusiones obtenidas del estudio de simulación.

A continuación, se suceden la bibliografía y los anexos.

## **2.- SIMULACIÓN DE SISTEMAS DISCRETOS. ENTORNO DE SIMULACIÓN WITNESS.**

### **2.1.- Simulación**

Según las ideas recogidas en [6] y [7], un sistema puede ser definido como un conjunto de entidades que actúan e interactúan entre sí con el objetivo de alcanzar algún fin lógico. Se trata del proceso o la estructura (sea física o no) que se desea estudiar. El estado de un sistema se puede describir como el conjunto de variables que son necesarias para definir el sistema en un instante determinado. Estas variables son las variables de estado.

En la mayoría de los casos, existe un punto en la vida de un sistema en el que es necesario estudiarlo para entender las relaciones entre algunos de sus componentes, o para predecir su funcionamiento bajo unas condiciones nuevas y distintas a las planteadas con anterioridad. Si fuera posible y económicamente viable alterar el sistema físicamente y dejar que opere con las nuevas condiciones, lo estudiaríamos de esta manera, ya que no cabría duda de la validez del estudio. Sin embargo, en muchos casos experimentar o alterar un sistema real para sacar unas conclusiones puede resultar muy caro o muy disruptivo. En otros casos el sistema ni siquiera existe. Por estas razones, suele ser necesaria la construcción de un modelo en representación del sistema real sobre el que realicemos los experimentos necesarios para su estudio.

Normalmente, los modelos que se utilizan para el análisis de sistemas son modelos de tipo matemático en vez de modelos físicos (como lo sería un modelo de un coche a escala con el que hacer pruebas en un túnel de viento, por ejemplo). Los modelos matemáticos sirven para representar el sistema a través de relaciones lógicas y cuantitativas que se manipulan para observar cómo reacciona el modelo y, por tanto, cómo debería de hacerlo el sistema real. Estos modelos nunca serán más que una aproximación al sistema real.

A su vez, los modelos matemáticos pueden ser de dos tipos: analíticos o de simulación. Los primeros están orientados a obtener soluciones exactas y óptimas y cuentan con una estructura determinada a la que se adapta la realidad. Por esto último están muy limitados y no sirven para representar sistemas altamente complejos. Los modelos de simulación por su parte no tienen estructura característica. Para construir un modelo de este tipo se parte de cero y se han de hacer suposiciones o simplificaciones del sistema representado, lo cual les ofrece

gran flexibilidad y capacidad de representación de sistemas más complejos que en el caso de los modelos analíticos.

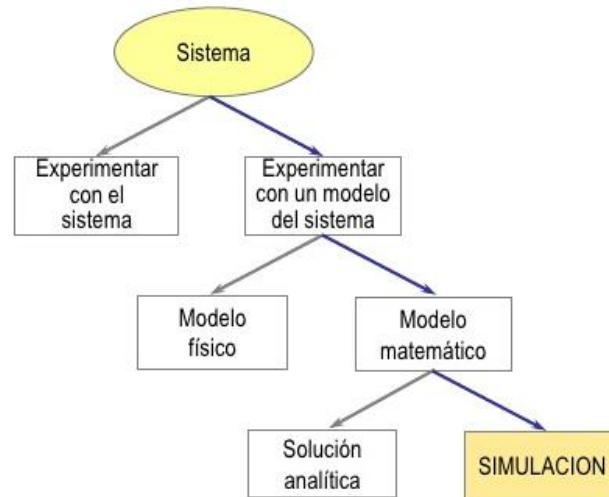


Fig. 2.1. Maneras de estudiar un sistema. Fuente: [7]

### 2.1.1.- Etapas de la simulación.

Como casi cualquier tipo de estudio, una simulación se desarrolla en varias etapas. Sin embargo, es importante entender que un estudio de simulación no es un simple proceso secuencial o lineal. A medida que se avanza en el estudio se va obteniendo un conocimiento mayor sobre el sistema a estudiar, lo que provoca tengamos que volver a pasos anteriores, convirtiéndolo en un proceso iterativo.

La figura 2.2 contiene las etapas del proceso de un estudio de simulación.



Fig. 2.2. Etapas de la simulación. Fuente: [9]

#### a. **Formulación del problema:**

Todo estudio debe comenzar en base a unos objetivos generales. Además, siempre que sea posible, se deben establecer tanto los cambios en el sistema que se desean implementar como el criterio con el que se va a evaluar la eficacia de dichos cambios. Por otro lado, es muy importante conocer a fondo el funcionamiento del sistema que se quiere simular. La precisión en el entendimiento de los factores que intervienen en el sistema determinará en gran medida la calidad del modelo y, por tanto, de la simulación.

#### b. **Definición del modelo.**

Los modelos de simulación se pueden clasificar de distintas formas. En primer lugar, pueden ser estáticos si representan un sistema en un momento de tiempo determinado o un sistema que no es afectado por el paso del tiempo o dinámicos, si el sistema evoluciona con el tiempo. También se pueden clasificar según sean modelos discretos o continuos. Un modelo discreto es aquel en el que las variables de estado van cambiando en cada instante separado del tiempo, mientras que en un modelo continuo lo hacen de forma continua con el paso del tiempo. Por último, los modelos de simulación pueden ser estocásticos o deterministas, si contienen variables aleatorias o no las contienen, respectivamente.

La creación de un modelo de simulación se considera como una combinación entre arte y ciencia. El modelo nunca va a ser más que una aproximación al sistema actual. El proceso de modelado es un proceso iterativo que está íntegramente ligado al de validación, que consiste en determinar si el modelo de simulación es una representación precisa del sistema, para los objetivos particulares del estudio. Estos objetivos van a ser los que determinen el modelado. Un modelo de un mismo sistema puede ser válido en función de unos objetivos y puede no serlo en función de otros. Esta validación de los objetivos será la que determine el nivel de detalle adecuado en el modelo. [8]

No existen reglas sobre cómo llevar a cabo una modelización. Sin embargo, se suele estar de acuerdo en que es mejor empezar por un modelo poco detallado que se pueda hacer más sofisticado sucesivamente.

**c. Recolección de datos de alimentación del modelo.**

En cualquier modelo de simulación estocástico va a existir una o más de una variable de entrada aleatoria de entrada al modelo. En caso de que existan datos empíricos que se puedan obtener del sistema, se puede alimentar el modelo utilizando los propios datos, definiendo una distribución empírica de probabilidad de la que se generen valores aleatorios o generando valores aleatorios a partir de una distribución de probabilidad teórica a la que se ajusten los datos recogidos. La opción preferible de las tres es la que utiliza una distribución de probabilidad teórica. Esto se debe a que las distribuciones de probabilidad teóricas permiten generar un número ilimitado de valores para la variable aleatoria, a diferencia de la opción de uso de los propios datos, y a que evitan las irregularidades que puedan tener las distribuciones empíricas, además de posibilitar que sucedan casos extremos que se encuentran fuera del rango de los datos.

La mayoría de las técnicas que se utilizan en el ajuste de datos tienen como condición inicial que las observaciones de la variable aleatoria sean independientes e idénticamente distribuidas (IID), es decir, que cada observación tenga la misma



distribución de probabilidad que las demás y que sean todas mutuamente independientes. [10]

**d. Validación.**

La validación consiste en determinar si el modelo conceptual es una representación adecuada y correcta del sistema que se desea estudiar de acuerdo con los objetivos del estudio. Es una consecuencia de que el modelo solamente sea una aproximación al sistema real y debe ser llevado a cabo durante todo el estudio de simulación.

La dificultad de la validación incrementa en estudios en los que no existe el sistema representado. En caso de que sí exista, la dificultad de la validación depende de la complejidad de dicho sistema.

**e. Desarrollo de un modelo informático y verificación.**

Durante la programación del modelo de simulación se debe llevar a cabo el proceso de verificación, que consiste en determinar si la programación llevada a cabo está depurada de errores. La verificación garantiza que se traduce de forma fiel el modelo conceptual a un modelo informático.

**f. Realizar simulaciones de prueba**

Se realizan con el objetivo de validar el modelo.

**g. Diseño de experimentos**

Se debe decidir qué clase de diseños del sistema se quieren simular.

**h. Simulaciones y análisis de resultados.**

Se realizan repeticiones de las simulaciones de las que se obtienen datos del comportamiento del modelo en sus diferentes configuraciones. Los datos se analizan mediante técnicas estadísticas para obtener los resultados de los que precise el estudio.

### **i. Documentación, presentación e implantación de los resultados.**

Como en ocasiones los modelos de simulación se utilizan para más de una aplicación, es importante documentar acerca de las simplificaciones que se hayan llevado a cabo, así como del funcionamiento del propio programa informático.

## **2.2.- Softwares de simulación**

Existe un gran abanico de posibilidades en cuanto a la elección de un software con el que llevar a cabo el proceso de desarrollo de un modelo informático en un estudio de simulación. Sin embargo, hay una serie de funciones o características necesarias que son comunes en la mayoría de los procesos de programación de modelos de simulación de sistemas discretos. Entre ellas se incluyen la generación de números aleatorios, la generación de valores aleatorios a partir de una distribución de probabilidad determinada, un tiempo de simulación que avanza, la recolección de estadísticas de variables de salida... La recurrencia de este tipo de características llevó al desarrollo de paquetes específicos para la simulación. El desarrollo de estos paquetes han sido factores determinantes en el incremento de popularidad de la simulación en las últimas décadas.

### **2.2.1.- Ventajas y desventajas del software de simulación**

La elección de un software de programación para crear un modelo informático juega un papel muy importante en el devenir del estudio de simulación. Para tomar una decisión adecuada, es necesario conocer las ventajas e inconvenientes en el uso de un software de simulación en comparación con usar un lenguaje de programación de propósito general: [7]

Ventajas de los paquetes de simulación:

- Cuentan con la mayoría de las características que se necesitan a la hora de crear un modelo, lo cual disminuye considerablemente la cantidad de tiempo invertido en la programación, lo que a su vez contribuye a que se cometan menos errores.
- Proporcionan un marco de trabajo natural para modelizar.
- Los modelos programados en este tipo de paquetes son más fáciles de modificar que los programados en lenguajes de propósito general.
- Proporcionan una detección de errores más eficaz.

Inconvenientes de los paquetes de simulación:

- El tiempo de ejecución del modelo suele ser más lento.
- Suelen ser menos flexibles que los lenguajes de programación de propósito general
- El coste del software suele ser mayor.
- Precisan de lenguajes de programación menos conocidos.

### **2.2.2.- Clasificación del software de simulación**

Hay dos criterios según los que se puede hacer una clasificación del software de simulación, según lo específico que sea y según el enfoque que utilice en la modelización: [7]

Según lo específico que sea:

- Lenguajes de simulación: son los paquetes de simulación de propósito general. La programación de los modelos se lleva a cabo escribiendo código. Cuentan con una gran flexibilidad en la modelización, pero suelen ser complicados de utilizar
- Simuladores: están orientados hacia aplicaciones más específicas. La modelización se desarrolla mediante elementos como gráficos o cuadros de diálogo y son más fáciles de aprender a utilizar que los lenguajes de simulación, pero menos flexibles.

Sin embargo, durante los últimos años la distinción entre estos dos tipos de software de simulación se ha difuminado, ya que los paquetes de simulación modernos suelen incluir características intermedias entre los dos tipos.

Según el enfoque de modelización:

- Programación de eventos: se modela identificando los eventos característicos del sistema y escribiendo a continuación un conjunto de secuencias de eventos que contienen la información detallada acerca de los cambios de estado que se producen en el momento que acontece un evento. Este tipo de modelado tiene la propiedad de que no pasa tiempo de simulación cuando se ejecuta.
- Interacción de procesos: se basa en describir los procesos que sufre una entidad a medida que fluye por el sistema, siendo un proceso una secuencia ordenada en el tiempo de eventos interrelacionados y separados entre sí por intervalos de tiempo. Este enfoque es el que se usa más a menudo hoy en día.

### **2.2.3.- Características deseables de un software de simulación.**

Existe un gran número de características que se deben tomar en consideración a la hora de elegir un software de simulación. Estas características se pueden recoger en los siguientes grupos: [7]

#### **Capacidades generales.**

Una de las características más importantes que debe tener un software de simulación es flexibilidad en el modelado. Por otro lado, también son características importantes la facilidad de usar y la facilidad de aprender a usar el software, la velocidad de ejecución del modelo o la capacidad de importar y exportar datos del modelo. [7]

#### **Animaciones.**

El uso de un software que disponga de animaciones es muy recomendable. En ellas, se representan elementos clave del sistema en forma de figuras que cambian dinámicamente de posición, color o forma a medida que avanza la simulación.

Las animaciones tienen diversos usos, entre los que se destacan el uso de comunicar la esencia del modelo de simulación, de depurar el modelo de errores, de enseñar que el modelo no es válido y de sugerir posibles alternativas de mejora del sistema.

#### **Capacidades estadísticas.**

Determinan la validez de los resultados obtenidos del estudio de simulación. El software debe tener un buen generador de números aleatorios, una buena selección de distribuciones de probabilidad teóricas para usar en el modelo y debe permitir la definición y el uso de distribuciones empíricas. También debe contar con un método contrastado que permita construir intervalos de confianza para una media (como el método de replicación) y debe permitir la determinación de un tiempo de calentamiento para las simulaciones y la elección de los parámetros de salida sobre los que obtener datos.

#### **Documentación.**

La facilidad o rapidez en el aprendizaje del uso del software depende en gran medida de la existencia o no de un manual de uso para el usuario que sea completo, esté bien estructurado y cuente con numerosos ejemplos.

## **Informes.**

El software debe proporcionar informes estándar para las variables de salida y los informes deben poder ser customizados.

### **2.3.- Herramienta de simulación Witness**

El paquete de simulación Witness, cuyo fabricante es Lanner Group, es uno de los programas punteros en la simulación de procesos dinámicos. Varias empresas multinacionales hacen uso de sus servicios en el proceso de toma de decisiones. Se trata de una herramienta sencilla para el usuario pero que cuenta con numerosas funcionalidades y permite modelar de forma precisa una gran variedad de sistemas, por lo que se utiliza en una gran diversidad de sectores, como el automovilístico, el farmacéutico, el de defensa, en electrónica, en aeropuertos o en hospitales.

Algunas de las razones por las que Witness ha alcanzado gran popularidad son las siguientes:  
[11]

- Cuenta con una variedad de elementos que resultan muy útiles a la hora de crear un modelo
- Permite la creación de modelos en los existen eventos discretos y continuos.
- Cuenta con entornos de simulación en 2D y en 3D que son fáciles de utilizar.
- Presenta facilidades a la hora de importar y exportar datos mediante otros programas informáticos.
- El lenguaje de programación que emplea es intuitivo y simple.

#### **2.3.1.- Elementos en Witness**

En Witness, los modelos están compuestos por diferentes elementos que se relacionan entre sí mediante reglas lógicas, denominadas de entrada y de salida. Cada uno de estos elementos representará uno de los factores que intervienen en el estado del sistema. Se pueden dividir en cuatro categorías: discretos, continuos, lógicos y los gráficos y de informes. Cada una de estas categorías engloba los siguientes elementos: [12]

#### Elementos discretos:

- Partes: son entidades representativas de los elementos discretos que se desplazan por el modelo.
- Bufer: sirven para almacenar partes.
- Máquinas: representan cualquier tipo de elemento real que coja una parte de algún lugar, la procese y la envíe a un destino
- Citas transportadoras: mueven partes desde un punto a otro del modelo durante un periodo de tiempo
- Vehículos: transportan a las partes
- Vías: son los caminos por los que pueden circular los vehículos
- Recursos: representan recursos humanos o físicos que puedan ser necesitados en el modelo
- Módulos: son elementos que contienen grupos de elementos.

#### Elementos continuos:

- Fluidos: son elementos que discurren de forma continua por elementos citados a continuación.
- Tanques: almacenan los fluidos
- Procesadores: los fluidos entran a los procesadores y, tras someterse a algún tipo de operación, salen de ellos.
- Tuberías: transportan fluidos y conectan tanques y procesadores

#### Elementos lógicos:

- Atributos: van vinculados a las partes.
- Variables: son valores a los que se puede acceder desde cualquier lugar del modelo.
- Distribuciones: permiten generar en el modelo variabilidad basada en los datos recogidos del sistema.
- Archivos: para importar datos a la simulación o exportar informes o datos que puedan ser utilizados en otros programas
- Funciones: son funciones existentes en el programa que sirven para determinar el comportamiento de elementos del sistema o para informar del estado de los elementos.
- Turnos: simulan una secuencia de periodos de trabajo y de descanso.

- Archivos de entidades: contiene una serie de entidades para las que se puede especificar el tamaño del lote, los atributos de cada entidad y el instante de llegada de cada entidad al modelo.

Elementos gráficos y de informes:

- Diagramas de tarta: permiten representar resultados mediante un diagrama de sectores.
- Serie temporales: permiten representar los resultados del modelo en forma de un gráfico que representa valores en función del tiempo.
- Histogramas: representan resultados en forma de un diagrama de barras.
- Informes: permite la generación de informes personalizables.

### **2.3.2.- Gestión de elementos.**

El comportamiento de los elementos de un modelo programado con Witness dependerá de las reglas y acciones que se les haya impuesto. [12]

#### Reglas.

Las reglas de entrada y salida direccionan a las entidades y a los fluidos estableciendo entre qué elementos se van a mover. Permiten utilizar decisiones complejas basadas en casi cualquier criterio.

#### Acciones.

Dotan al modelo de la lógica de la que precisa para que su funcionamiento sea el correcto. Las acciones pueden utilizarse en la gestión de la interacción entre el usuario y el modelo, en etapas clave de operación de los elementos, en la determinación las condiciones iniciales de funcionamiento y en cualquier momento durante la ejecución del modelo.

### 3.- SISTEMA REAL

#### 3.1.- Descripción del sistema real

El municipio de Rivas-Vaciamadrid se encuentra al este del área metropolitana de Madrid. Con una población de 87380 habitantes, se trata de uno de los municipios españoles con mayor crecimiento demográfico de las últimas décadas (en 1980 contaba con 500 habitantes). Acompañando a esta expansión demográfica, ha existido un crecimiento urbanístico muy notable hacia el norte, acercándose más y más al centro de la capital. [13] [14]



Fig. 3.1. Evolución de la población de Rivas en los últimos años. Fuente [13]

Según datos de la INE, Rivas es la ciudad española de más de 50000 habitantes con menos población mayor de 65 años (aproximadamente el 6,19% de la población).



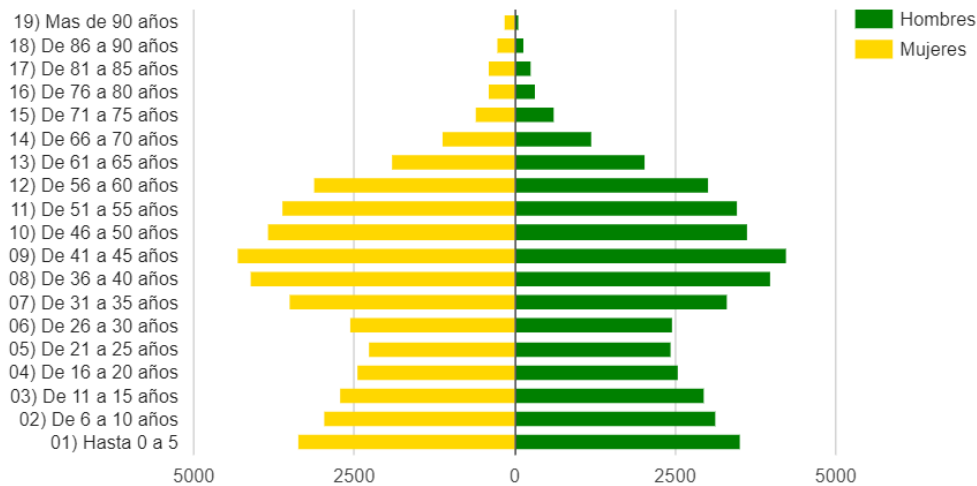


Fig. 3.2. Número de habitantes en Rivas por edades y género. Fuente: [13]

De acuerdo con estos datos, es de esperar que una gran cantidad de residentes del municipio salgan de este por la mañana para cumplir con su jornada laboral o para ir al colegio. Si estos habitantes utilizan el transporte por carretera, es muy posible que sus rutas coincidan con la salida a la autopista A-3, que conecta con el centro de la ciudad de Madrid tras cruzar con la autopista M-50. Esto produce retenciones de tráfico en distintos puntos del municipio. Una de las vías en la que se concentra una mayor cantidad de vehículos atascados por la mañana es la Avenida los Almendros, en concreto, en un tramo de la vía que precede a una rotonda localizada según las coordenadas 40.357162, -3.547369.

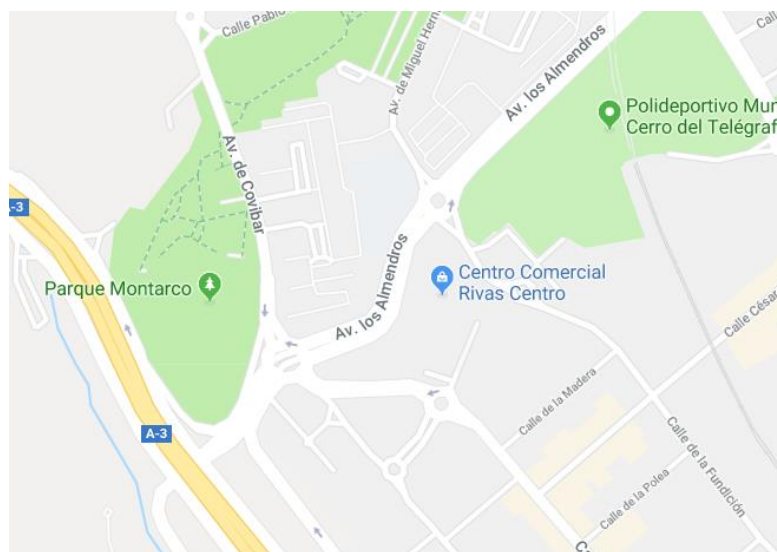


Fig. 3.3. Mapa de la Avenida los Almendros

Se trata de un tramo de casi 500 metros de longitud seguido de la rotonda en cuestión, que tiene las características de una turbo rotonda.

Una turbo rotonda difiere de una rotonda normal en que el conductor debe elegir la salida a la que se va a dirigir antes de entrar en la rotonda. No existe un carril exterior, sino que hay un solo carril que se aproxima y se divide en varios de giro. El conductor, una vez elegido el carril por el que desea circular, no tiene posibilidad de cambiarse y se evitan situaciones de colisión fronto-lateral. Por esto último, en algunas situaciones las turbo rotondas son más seguras que las glorietas convencionales. [15]



Fig. 3.4. Turbo rotonda. Fuente: [15]

La rotonda en cuestión es la que se puede observar en las figuras 3.5 y 3.6:



Fig. 3.5. Rotonda del sistema.

Como se puede ver, cada uno de los brazos de la rotonda han sido denominados con una letra para hacer referencia a ellos con mayor comodidad, así siendo A la letra utilizada para referirse a las vías que llegan y salen de la rotonda por el suroeste, B para denominar a las del noreste, C para las del noroeste y D para las del sureste. Esta nomenclatura será la utilizada de aquí en adelante.



Fig. 3.6. Rotonda del sistema.

Como se ha dicho con anterioridad en el capítulo 2, es crucial entender a fondo el funcionamiento del sistema por lo cual se procede a hacer una explicación detallada.

Cada uno de los brazos de la rotonda cuenta con un paso de peatones con su correspondiente semáforo, cuyo funcionamiento se explicará más en adelante.

De cada uno de los brazos es importante saber:

- **Brazo A:** La entrada a la rotonda por A proviene de dos carreteras separadas que convergen a unos 45 metros antes de su paso de cebra correspondiente. Antes de dicho paso de cebra, los vehículos deben de posicionarse en el carril correspondiente a la salida que quieran tomar, estando los dos carriles de la izquierda dedicados a los vehículos que quieran acceder al carril interior de la rotonda para seguir de frente y salir por B o seguir por la rotonda, el siguiente carril a la derecha reservado para los que quieran acceder al carril externo de la rotonda, lo cual les permite salir por D o por B o colocarse en el carril de la derecha que les permite salir por D sin tener que respetar ningún ceda el paso.
- **Brazo B:** Los vehículos que entren a la rotonda desde B deberán elegir carril antes de su paso de cebra. Así deberán colocarse en el carril derecho si quieren salir por C o acceder al carril externo de la rotonda y salir por A o por lo contrario deberán situarse en el izquierdo para coger el carril interno que les permite salir por A o continuar por la rotonda.
- **Brazo C:** Después del paso de cebra correspondiente a esta vía, el único carril por el que circulaban los vehículos en dirección a la rotonda se divide en dos carriles: el izquierdo les servirá para ir en cualquier dirección y el derecho les obligará a salir por A. En caso de querer continuar por la rotonda, existe una marca vial de cuadrículas amarillas en su camino que prohíbe la parada de vehículos sobre ella.
- **Brazo D:** Los vehículos que lleguen a la rotonda desde D verán que, tras el paso de cebra que cruza la vía por la que circulan, el carril existente se divide en dos. El izquierdo les da la posibilidad de elegir cualquier salida y el derecho les fuerza a salir por B. Más a la derecha de este último carril, existe un pequeño carril auxiliar en el que se podrían incorporar un número reducido de vehículos en caso de atasco para

liberar al carril derecho principal. Dicho carril auxiliar también obliga a los vehículos a salir por B. Además, para los vehículos que deseen continuar por la rotonda, existe una cuadrícula amarilla que funciona de igual manera que la explicada anteriormente para el brazo C.

La figura 3.7 esquematiza lo explicado:

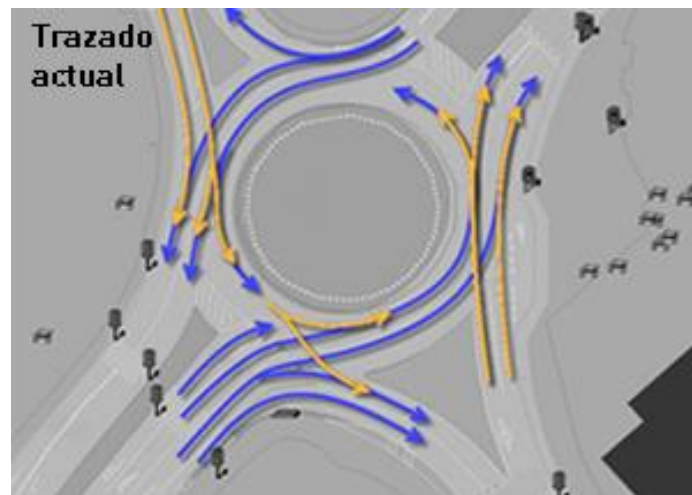


Fig. 3.7. Esquematización del flujo de vehículos en la rotonda. Fuente: [16]

Es importante explicitar los límites de la realidad que se incluye en el modelo valorando que esos límites sean compatibles con la obtención de resultados válidos sobre el comportamiento del sistema que se pretende modelizar. Durante el modelado, explicado más adelante, se llegó a la acotación de la realidad que se observa en la figura 3.8. En esta figura se delimita la región de control y de estudio del problema. También se observa la nomenclatura que servirá para especificar si una vía es de entrada a la rotonda (subíndice 'e') o si sale de ella (subíndice 's').





Fig. 3.8. Región de estudio del sistema y nomenclatura.

Como consecuencia de esta acotación de la realidad, es de importancia también conocer que los vehículos que llegan a la rotonda por el brazo C provienen de dos calles con semáforos que se alternan entre sí con unos tiempos fijos a unos 300 metros de la rotonda por carretera. La calle principal de la que provienen se ha designado como Ee1 y la secundaria como Ee2. Entre cada cambio, hay un tiempo de seguridad de 3 segundos, tras los 3 segundos de ámbar, en el que los dos semáforos están en rojo para los coches. Los tiempos en rojo y en verde para los coches de los semáforos están contenidos en la siguiente tabla (el tiempo que permanece cada semáforo en ámbar está incluido en el tiempo en rojo).

**TABLA 3.1. TIEMPOS DE LOS SEMÁFOROS EE1 Y EE2**

Semáforos	Duración en rojo (para coches) [s]	Duración en verde (para coches) [s]
Ee1	39	41
Ee2	53	27

Por otra parte, los semáforos con sus respectivos pasos de cebra que se encuentran próximos a la rotonda en cada uno de los brazos de esta sirven para regular el cruce de los peatones. Se tratan de semáforos de pulsador que sólo se pondrán en verde para los peatones cuando accione el pulsador un peatón y tras transcurrir un tiempo determinado. Estos semáforos, por lo tanto, no están coordinados entre sí.



Fig. 3.9. Pulsador en un semáforo de pulsar.

El tiempo que tendrá que esperar un peatón hasta que pueda cruzar depende del tiempo que haya transcurrido desde la última vez que el semáforo se puso en rojo para los peatones. Por esto, cada semáforo cuenta con un tiempo de espera máximo y un tiempo de espera mínimo para los peatones de forma que, si un peatón pulsa justo después de que se le haya puesto rojo el semáforo, tendrá que esperar el tiempo de espera máximo mientras que, si el semáforo lleva un rato largo en rojo cuando, cuando pulse el peatón tendrá que esperar el tiempo de espera mínimo.

Más concretamente, si el tiempo transcurrido entre el último cambio del semáforo a rojo y el instante en el que pulsa el peatón es mayor o igual a la diferencia entre la espera máxima y la mínima, el peatón tendrá que esperar el tiempo mínimo. En caso contrario, el tiempo a esperar será la resta entre el tiempo máximo y el tiempo transcurrido desde que se puso en rojo el semáforo hasta que pulsó el peatón. Por poner un ejemplo, si la espera máxima es de 50 segundos y la mínima de 10, si el peatón pulsa 15 segundos después de que el semáforo se haya puesto en rojo, tendrá que esperar 35 segundos. Si por el contrario el peatón pulsa pasados los 40 segundos desde que se le puso en rojo, tendrá que esperar 10 segundos.

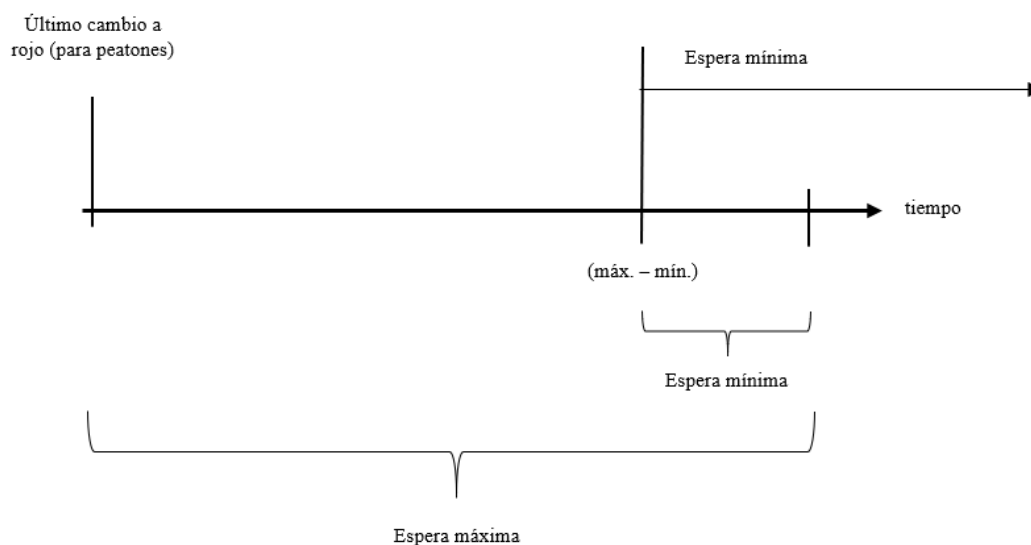


Fig. 3.10. Esquematzación del funcionamiento de los semáforos de pulsar del sistema real

El tiempo que permanece el semáforo en verde para que puedan cruzar los peatones y los tiempos de espera máximos y mínimos dependen de cada semáforo y son fijos.

El último detalle por explicar del sistema es que en los semáforos de A y de B existen unos tiempos para las vías de salida de estos dos brazos en los que el semáforo se encuentra en verde para los peatones y en amarillo intermitente para los vehículos, que podrán avanzar siempre y cuando no exista ningún peatón cruzando.

Todos estos tiempos están recogidos en la siguiente tabla:



**TABLA 3.2. TIEMPOS DE LOS SEMÁFOROS A, B, C Y D**

<b>Semáforos</b>	<b>Espera máxima para peatón [s]</b>	<b>Espera mínima para peatón [s]</b>	<b>Duración en rojo (para coches) [s]</b>
<b>A (entrada)</b>	50	15	37
<b>A (salida)</b>	50	15	23 + 14 (amarillo intermitente)
<b>B (entrada)</b>	50	4	33
<b>B (salida)</b>	50	4	22 + 11 (amarillo intermitente)
<b>C</b>	50	4	22
<b>D</b>	48	4	22

### **3.2.- Desarrollo del flujo y periodos de interés.**

Tras un seguimiento de varios días, se pudo concluir que el momento de la mañana en el que mayor atasco hay en la Avenida los Almendros en el tramo previo a la turbo rotonda o, dicho de otra forma, por la entrada a la rotonda por B, es desde las 9:00 a.m. hasta las 9:30 a.m. aproximadamente cualquier día entre la semana.

En este intervalo horario hay vehículos entrando al sistema por B y dirigiéndose a la rotonda con una frecuencia muy alta. Al llegar a la rotonda, la mayoría de ellos seguirán de frente y saldrán por A. Para realizar este trayecto, se pueden ver obligados a parar para respetar los semáforos de A o de B, o en caso de tener que respetar la señal de ceder el paso al llegar a la glorieta debido a que algún vehículo se aproxime circulando por ella. Estas tres situaciones son las que generan el atasco. El paso de peatones más demandado es el de A, y, por tanto, su semáforo es el que más a menudo cambia a rojo para los vehículos. Cuando esto sucede, el tramo de rotonda entre B y A se atasca y es prácticamente el único momento en el que los coches que lleguen a la rotonda por C que quieran continuar de frente por la rotonda pueden hacerlo ya que ningún vehículo de los atascados se puede detener sobre la cuadrícula amarilla del pavimento, permitiendo a los llegados por C avanzar. En la figura 3.11 se puede apreciar una explicación gráfica de la situación anterior.

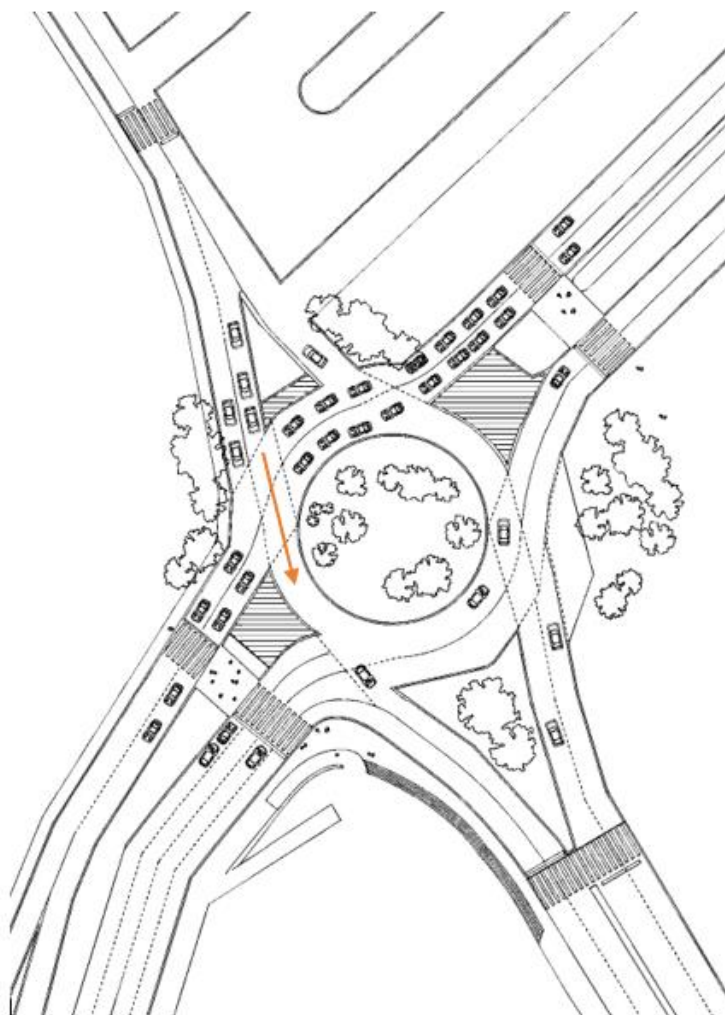


Fig. 3.11. Situación en la que los vehículos que entran por C en la rotonda pueden avanzar de frente.

## **4.- MODELO**

En este capítulo se explican en detalle las fases que han sido llevadas a cabo en la creación de un modelo del sistema real. Este modelo tendrá como objetivo encontrar una o varias teorías de mejora del flujo del tráfico en el tramo de carretera de la Avenida los Almendros que precede a la rotonda, así como obtener una cuantificación de esas potenciales mejoras en términos de reducción de los tiempos de tránsito.

Los principales factores que intervienen en la generación del atasco son las vías con sus señalizaciones y semáforos y los peatones, así que se busca traducir estos factores reales y las relaciones entre ellos a un modelo para estudiarlo y modificarlo con el fin de alcanzar el cumplimiento de los objetivos.

### **4.1.- Alternativas de mejora.**

En este epígrafe se plantean los posibles cambios en el sistema que hipotéticamente podrían hacer que se cumpliese con el objetivo de la reducción de tráfico.

La mejora de un aspecto del sistema podrá traer consecuencias negativas sobre otro u otros aspectos. Las teóricas mejoras que se propondrán implantar en el sistema tendrán como objetivo reducir al máximo el tiempo que tarda un vehículo en atravesar el tramo con mayor congestión de tráfico siempre y cuando el posible perjuicio que supongan sobre otros vehículos o peatones en cuanto a demoras sea asumible y lógico.

Del sistema llama la atención que los semáforos funcionen de la misma manera sea hora pico de afluencia u hora valle. Una de las propuestas de mejora tiene que ver con variar los parámetros temporales de los semáforos A y B según la hora del día. Así, se podría hacer que los peatones tuvieran que esperar algo más (aumentando los tiempos de espera máximos y/o mínimos de los semáforos) o reducirles el tiempo de cruce (disminuyendo el tiempo que su semáforo está en verde) en favor de la fluidez del tráfico.

Estas opciones tienen la ventaja de ser muy baratas de implementar, ya que para ello solamente habría que cambiar la programación de los semáforos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas opciones, aparte de tener efecto sobre los peatones, podrían también tener

impacto negativo en la fluidez de la vía de acceso a la rotonda por Ce por lo dicho en el subcapítulo 3.2.

Una medida para solucionar esto último podría ser la de coordinar el semáforo C con el semáforo A de forma que siempre que este último esté en rojo para coches, el semáforo C lo esté en verde. Cuando el semáforo A se encontrase en verde, el semáforo C funcionaría con normalidad.

Otra posible solución es la de crear un carril auxiliar en el último tramo de la Avenida los Almendros (Be) para los vehículos que quieran ir a la derecha y salir por Cs. Dicho carril eximiría a estos vehículos de entrar a la rotonda, ya que saldrían de la vía por la que circulan antes de llegar a ella. Este carril desembocaría en la vía Cs, a la que para entrar tendrían que cederle el paso a los vehículos que ya circulen por ella. Presumiblemente, esta opción podría liberar parte del atasco de Be y no se perjudicaría el flujo de tráfico por Ce.

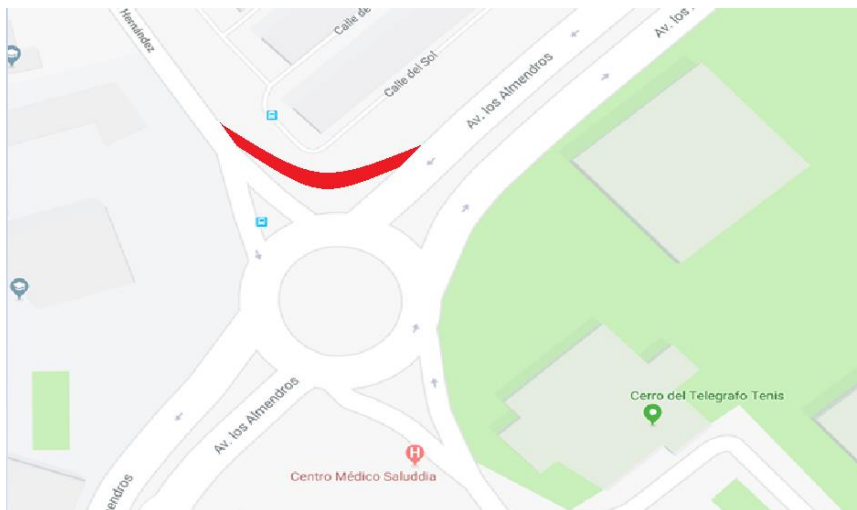


Fig. 4.1 Lugar donde se construiría la carretera auxiliar.

La principal desventaja de esta opción frente a las anteriores es que esta cuesta mucho más dinero. Además, habría que talar algunos árboles como se puede apreciar en la figura 4.2.



Fig. 4.2. Zona de parque que se sustituiría por la carretera auxiliar.

La última posibilidad de mejora que se plantea es la de construir una pasarela peatonal en la zona del paso de cebra de B.



Fig. 4.3. Pasarela para peatones.

Esta solución permitiría a los peatones cruzar la vía sin tener que esperar un semáforo y reduciría el tráfico por Be hipotéticamente.

De nuevo existen los inconvenientes de costes y de tala de árboles, además de las posibles consecuencias sobre el flujo de tráfico en Ce



Fig. 4.4. Zona en la que se construiría la pasarela para peatones.

El modelo de simulación permitirá hacer una valoración cuantitativa de la medida en la que estas hipotéticas mejoras contribuyen a la mejora del problema de tráfico lento detectado.

#### 4.2.- Modelo Conceptual.

Desde el comienzo del proceso de modelización, se decidió que existirían unas entidades representativas de los vehículos que irían circulando por caminos en representación de cada carril de las vías del sistema real. Los caminos debían tener unas dimensiones relativas al resto del modelo correspondientes a las longitudes del sistema real. Estos vehículos ficticios deberían circular por su camino respetando reglas acordes con las señales de ceder el paso o los semáforos en rojo que existen en la realidad. En el momento en el que saliesen de la zona en la que podían contribuir a la creación de atasco, saldrían del modelo.

También tendrían que existir entidades en representación de los peatones. Estos, tal como ocurre en la realidad, accionarían el pulsador del semáforo correspondiente al paso de cebrá por el que quieren cruzar, cruzando cuando transcurra un tiempo en la simulación acorde al tiempo que debe de transcurrir en la realidad. Salen del modelo tras cruzar el ficticio paso de cebrá.

Teniendo en cuenta lo anterior, se valoró que las variables de entrada aleatorias debían ser los intervalos entre llegadas de vehículos al sistema en cada una de las entradas al volumen de control y los intervalos entre llegadas de peatones a cada uno de los pasos de cebras incluidos en el modelo.

#### 4.2.1.- Principales simplificaciones iniciales.

En este epígrafe se explican las simplificaciones más importantes con respecto al sistema real que han sido tomadas desde el principio en el proceso de modelización. Solamente se estudian las más destacadas y evidentes ya que, al ser la realidad infinitamente compleja, existen muchas simplificaciones.

Probablemente la más significativa sea la de tomar que las velocidades de los vehículos en sus caminos son constantes para cada camino e iguales entre cada vehículo. Esto implica a su vez que, si un vehículo se para, ya sea por atasco o por señalizaciones, arrancaría directamente a la velocidad que tuviese el camino en el que le tocara circular. Esta simplificación nace de la presuposición de que programar vehículos que cambian de velocidades en un mismo camino según las circunstancias iba a ser muy complicado y de pensar que esto no iba a generar problemas de validación, siendo esto último, como veremos en el próximo apartado, una suposición falsa.

Otra simplificación viene de la decisión de que todos los vehículos que entrasen al modelo tuviesen medidas similares. En el flujo de vehículos real, circulan tanto motos, de pequeñas dimensiones, como autobuses o camiones, mucho más grandes. En la práctica, para establecer la relación entre longitud de un camino y entidades de vehículos que cupiesen en él, en el modelo se otorgó una longitud para cada vehículo de entre 4 y 4,5 metros y se le proporcionó una holgura a cada vía, ya que siempre va a existir espacio entre un coche y otro en la realidad.



Fig. 4.5. Longitud de un coche aleatorio.



En la misma línea, se decidió que una pequeña vía que existe en la realidad entre el semáforo de C y el de Ee1 no se representase en el modelo. La razón de no incluirla es porque muy pocos coches salen de ella en la realidad y se supuso que esto no tendría impacto en las zonas de tráfico que interesaban.

Por otro lado, como se ha mencionado en la explicación de los semáforos, en el modelo no existe la posibilidad de que un semáforo este en ámbar. Los segundos de semáforo en ámbar de la realidad cuentan como segundos en rojo en el modelo.

Por último, se presupone en el modelo que tanto vehículos como peatones vayan a respetar las reglas del tráfico. En este caso hay que mencionar que por el hecho de que la glorieta sea de tipo turbo rotonda, sí que existe un cumplimiento de las normas por la mayor parte de los usuarios, aunque, como es evidente, siempre existen excepciones.

#### **4.2.2.- Proceso de modelización e iteraciones.**

La primera idea a la que se llegó en cuanto al espacio de la realidad que se modelizaría fue la de tomar únicamente el espacio en el que se atascaban vehículos. Este espacio comprendía la vía Be, el fragmento de rotonda entre Be y As hasta después del semáforo de As y el brazo C hasta más allá de su semáforo. Las variables de entrada al modelo serían entonces los intervalos entre llegadas de vehículos por Be, Ce y los que llegasen al volumen de control por la zona de la rotonda no incluida, entrada denominada como De, además de los intervalos entre llegadas de peatones a los semáforos de A, B y C.

Para que los intervalos entre llegadas de vehículos sean datos IID, los datos han de ser tomados en un lugar en donde los vehículos siempre entren libremente a dicha vía, es decir, en un lugar donde la velocidad de un vehículo no dependa de la del vehículo de enfrente. Si se toman datos en una zona con algo de atasco y los vehículos están frenando en función de el de delante, los datos de intervalos entre llegadas serán dependientes y, por tanto, no válidos como datos de entrada. La límites de la realidad a representar dependen en gran medida de esto, ya que los vehículos tienen que entrar en el modelo desde la zona análoga de la vía desde la que se tomen estos datos.

Sin embargo, tras la toma de datos de la variable De se observó claramente que los datos no cumplían la condición IID ya que los coches entraban al volumen de control en lotes debido a factores relativos al funcionamiento de la parte de la rotonda no representada.



Se optó entonces por modelizar la rotonda entera, incluyendo cada brazo con su semáforo. La rotonda se dividiría en 4 tramos, y un vehículo no podría acceder a uno de estos tramos desde uno de los brazos si por el tramo anterior de rotonda estuviesen circulando vehículos. Esta regla modelizaría lo que ocurre en la realidad con las señalizaciones de ceder el paso.

De nuevo en el proceso de toma de datos, se observó que los vehículos que llegaban a la zona previa al semáforo de C lo hacían en lotes y que, por tanto, sus intervalos entre llegadas no cumplían la condición de IID necesaria para que fuesen variables de entrada. Esto se debía a la existencia de los semáforos alternantes de las vías Ee1 y Ee2, mencionados en el capítulo anterior, por los que tenían que pasar los coches que fueran a aproximarse a la glorieta por Ce. Tras este descubrimiento se decidió tomar un volumen de control más amplio aún, que incluiría hasta más allá de las vías Ee1 y Ee2.

Respecto a esto último, se llevó a cabo la simplificación de eliminar los segundos de seguridad en los que los semáforos de Ee1 y de Ee2 permanecen en rojo a la vez. En el modelo, estos segundos se han añadido al tiempo en verde de Ee2, para que siempre que uno esté en rojo el otro lo estará en verde. Esto simplifica mucho la programación y no influye demasiado en el flujo del tráfico ya que por Ee1 entran al modelo pocos vehículos.

Por otra parte, cuando se decidió modelizar la rotonda completa, la idea era asignarle a cada vehículo que entrase en el modelo información sobre la salida que iba a tomar según los datos que se recopilasen en el sistema. Para la toma de estos datos se debía hacer un seguimiento de cada vehículo que entrase en la rotonda para determinar qué salida es la que tomaba. Como en la práctica, tomar estos datos resultó ser demasiado complicado con los medios de los que se disponía, se tuvo que desechar la idea.

La solución a este problema fue la de idear un modelo en el que un vehículo ficticio iría viajando por su camino hasta que se encontrase con un punto de decisión en el que tuviera la posibilidad o la obligación de cambiar de camino. En estas situaciones de decisión, tomarían parte los números aleatorios que dictarían, teniendo en cuenta las probabilidades reales que tienen los vehículos de elegir un camino u otro, el itinerario de estas entidades. Esto supone tomar datos de un mayor número de zonas de la rotonda, pero evita tener que hacer el seguimiento coche a coche.

Estas fueron las iteraciones realizadas sobre el modelo tras recoger datos del sistema y antes de programar. Al comenzar con la programación, se fueron realizando más cambios en el modelo conceptual.

En la figura 4.6 se puede observar un esquema de cómo quedaba el modelo llegados a este punto. Este esquema muestra los distintos caminos del modelo por los que transcurrirían los coches. La llegada al final de uno de estos caminos supone un punto de decisión siempre y cuando el vehículo pueda elegir entre varios caminos nuevos. Los puntos de decisión vienen recuadrados y las opciones entre las que se pueden decidir están marcadas con números cuyas correspondencias se pueden ver en la tabla 4.1:

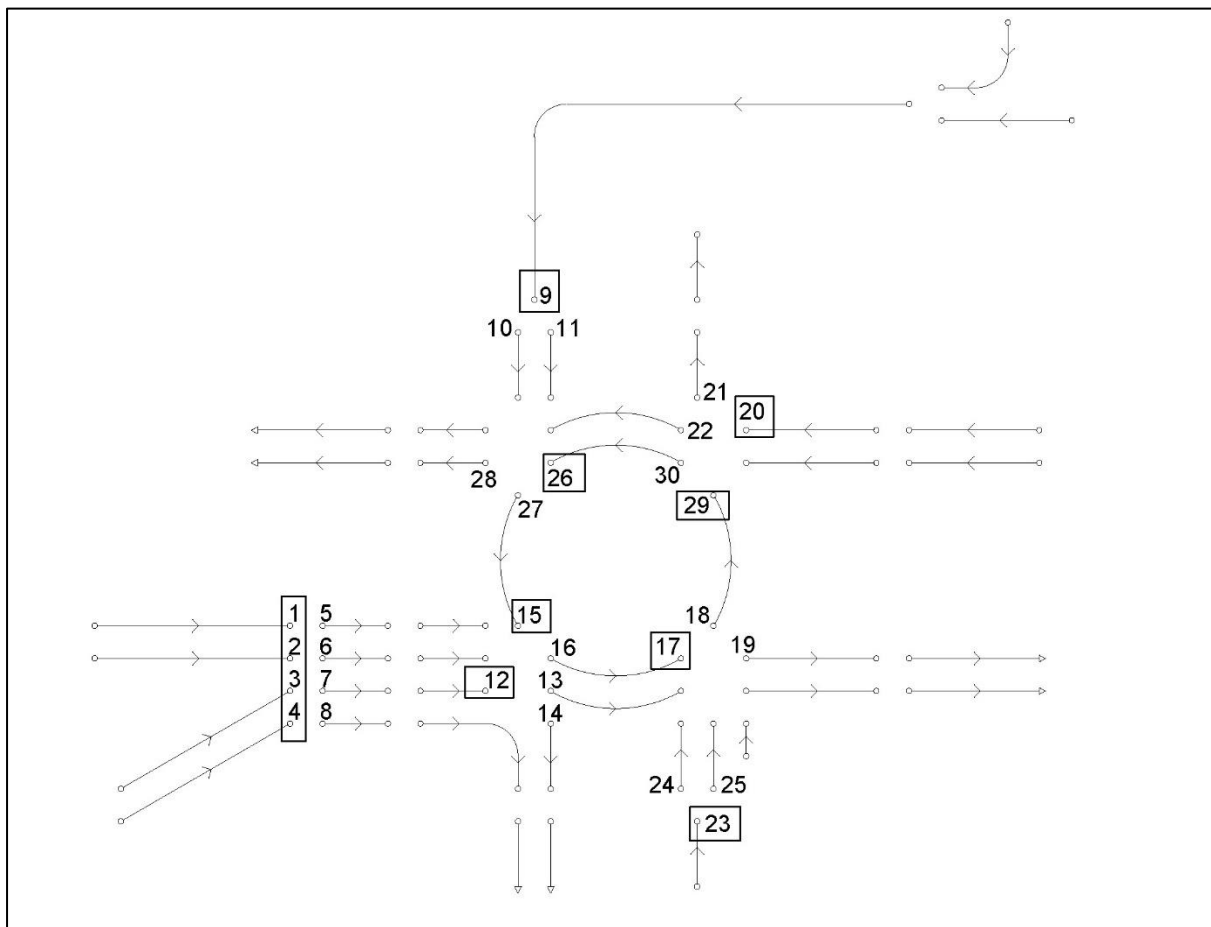


Fig. 4.6. Esquema del modelo durante el proceso de modelización.

**TABLA 4.1. OPCIONES POSIBLES EN CADA PUNTO DE TOMA DE DECISIÓN**

<b>Punto de toma de decisión</b>	<b>Opción u opciones.</b>
<b>1</b>	5, 6, 7, 8
<b>2</b>	5, 6, 7, 8
<b>3</b>	5, 6, 7, 8
<b>4</b>	5, 6, 7, 8
<b>9</b>	10, 11
<b>12</b>	13, 14
<b>15</b>	14, 16
<b>17</b>	18, 19
<b>20</b>	21, 22
<b>23</b>	24, 25
<b>26</b>	27, 28
<b>29</b>	21, 30

El modelo conceptual planteado fracasó en términos de validación al verse en la programación una fluidez del tráfico no acorde a la realidad. No existía ningún tipo de atasco. Se llegó a la conclusión de que este problema se debía a que las dos vías representantes de los carriles de unos 450 metros de Be tenían una velocidad constante.

En un atasco real, los vehículos pasan de estar parados a estar en movimiento constantemente. Esta transición no es inmediata con respecto al vehículo de enfrente, si no que va acompañada de un tiempo de reacción. Por otra parte, las distancias que avanzan los vehículos atascados antes de volver a detenerse suelen ser de pocos metros, distancias en las que se desplazan a velocidades muy inferiores a las que lo harían si no existiese el atasco.

En el modelo, lo que estaba sucediendo es que cada vez que se detenía un vehículo por hacerlo el de delante, al reanudar la marcha lo hacía en el instante en el que lo hacía el de delante (sin tiempo de reacción) y a la velocidad correspondiente a la vía fuese cual fuese la distancia.

Estas incongruencias entre lo real y lo representado obligaban a rediseñar el modelo de las dos vías de Be para recoger el nivel de detalle exigido por el sistema.

La primera solución que se planteó fue la de que la velocidad de las vías de Be variase de forma lineal entre un máximo y un mínimo en función del número de vehículos que

estuviesen transitando en cada instante dichas vías. Sin embargo, la idea se desechó por no ser una opción demasiado afín a la realidad.

La siguiente idea de modelado fue la de dividir las vías de Be en tres tramos con velocidades distintas, correspondientes a las velocidades reales de la vía. Además, los coches variarían su velocidad en función de la distancia a la que se encontrasen del vehículo de delante. A menos distancia, menos velocidad. Este enfoque representaba de una forma mucho más fiel lo que ocurre en la realidad. Sin embargo, a la hora de programar resultaba ser muy complicado y tedioso, por lo que se tuvo que rechazar.

Finalmente, y tras los anteriores intentos fallidos, se cambió el modelo por uno en el que estas dos vías estuviesen divididas en varios fragmentos de longitudes similares en los que la velocidad se limitase según el número de coches que estuviese sobre ellos. Así, cada fragmento contaba con tres posibles velocidades y los coches avanzaban a menos velocidad cuanto más atasco existía en la vía. Además, en este modelo los vehículos contaban con un tiempo de reacción con respecto al vehículo de delante de dos segundos al final de cada uno de los fragmentos.

Como se verá más en adelante, se ha podido hacer una validación de esta última versión del modelo con el que se ha acabado el proceso de modelización.

#### **4.2.3.- Variables aleatorias de entrada.**

Las variables de entrada al modelo diseñado son los intervalos de tiempo entre llegadas al modelo de los vehículos por cada una de las vías de entrada y los intervalos de tiempo entre llegadas de los peatones a los pasos de cebra. Las variables relativas a los vehículos tienen el nombre de la vía a la que entran en cada caso, por lo que se denominarán Ae1, Ae2, Be, De, Ee1 y Ee2. Las variables de entrada referente a intervalos entre llegadas de peatones son Pa, Pb, Pc y Pd, haciendo referencia a los que llegan a los semáforos correspondientes a los brazos A, B, C y D, respectivamente.

Además, en el proceso de toma de datos también hay que extraer porcentajes según la cantidad de vehículos que vayan por un carril u otro en los puntos de toma de decisión explicados.

#### **4.2.4.- Variables de salida.**

Las variables de salida deben aportar la información cuantitativa que nos permita, en primera instancia, validar el modelo y, en segundo lugar, determinar si las configuraciones alternativas hacen que se cumpla con los objetivos o no.

De esta manera, se ha considerado que la variable de salida que mejor puede cumplir con esos roles es la del tiempo que permanece en el modelo una entidad representativa de un coche que entra por Be, ya que deberá de atravesar todo el atasco. El objetivo será el de reducir el valor de dicha variable.

Otras variables de salida que se tomarán con el objetivo de validar el modelo serán los tiempos medios que pasan las entidades de vehículos sobre cada vía de acceso a la rotonda por cada una de sus ramas.

Por otro lado, también se estudiarán variables de salida que cuantifiquen el efecto negativo que puedan tener las configuraciones alternativas sobre otras entidades. Serán, el tiempo medio que pasa una entidad de vehículo sobre la vía de acceso a la rotonda por C y, en caso de que se prueben alternativas en las que se modifiquen los tiempos de espera de los peatones, los tiempos que permanezcan en el modelo los peatones afectados.

#### **4.3.- Recogida de datos y alimentación del modelo**

La recogida de datos es un aspecto esencial en la construcción y formalización del modelo. La formulación del modelo dicta cuáles son los datos que se han de recolectar sobre el sistema. Después, estos datos deberán someterse a un procesamiento adecuado con el objetivo de darles el formato del que precisa el modelo. Los datos necesarios para el modelo han sido establecidos en el punto 4.2.

Asimismo, es de gran importancia recoger en esta etapa del estudio datos que sean útiles a la hora de validar el modelo. Para ser más concretos, en el caso del sistema estudiado, se pudo estimar que el tiempo que pasa un vehículo desde que entra al atasco en la Avenida los Almendros hasta que sale de los límites del estudio es de entre 6 y 8 minutos aproximadamente, un trayecto que se realiza sin atasco en un minuto aproximadamente. Además, el número de vehículos que se encuentran en situación de atasco sobre este tramo de carretera en cualquier momento es de entre 400 y 500 vehículos.

#### 4.3.1.- Metodología moderna de recogida de datos en sistemas viales.

En la actualidad los avances tecnológicos facilitan en gran medida la toma de todo tipo de datos relativos a vehículos en circulación. En el pasado la toma de datos exigía que alguien se personase en el sistema y tomase los datos uno a uno. Hoy en día, datos como número de vehículos, distancias, velocidades o intensidad son tomados por sensores y cámaras. Algunos de estos sistemas modernos son las espiras magnéticas, los sensores por microondas, los sensores de infrarrojos, los de ultrasonidos y las cámaras IP, siendo estas últimas las que ofrecen mayor cantidad de información. [17]



Fig. 4.7. Espiras magnéticas. [17]



Fig. 4.8. Sensor por microondas. [17]

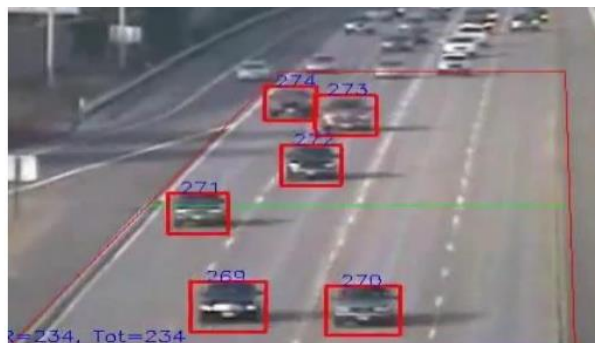


Fig. 4.9. Cámaras IP. [17]

#### 4.3.2.- Metodología llevada a cabo y limitaciones.

Como la rotonda cuenta con diversas cámaras, la idea inicial fue la de solicitar al ayuntamiento de Rivas-Vaciamadrid que facilitasen videos de la rotonda o datos históricos. Ante su negativa, solamente quedaba la opción de personarse en la rotonda y filmarla para recoger datos posteriormente sobre los videos tomados.

Por su parte, esto suponía un problema: debido a la extensión del sistema a representar, puntos de grabación quedan muy lejos entre sí, haciendo imposible la filmación de todos a la vez, que era lo idóneo. Sin embargo, como el atasco se repite de forma muy similar todos los días de entre semana durante la hora punta, era considerable dar como válida la suposición de tomar por igual el flujo de un día para otro, lo que permitía grabar en días distintos.

Para grabar los videos de los cuales recoger los datos de los veinte puntos del sistema en los que eran necesarios (diez de ellos relativos a intervalos de llegadas y los otros diez sobre puntos de toma de decisión) se precisó de ayuda de personas ajenas al proyecto y de 4 mañanas de grabación.

Por último, se hizo uso de un cronómetro para medir los intervalos entre llegadas de coches y peatones y se contó el número total de coches que llegaba a un punto de toma de decisión, así como la fracción de coches de ese total que avanzaba por cada una de sus alternativas. En la tabla 4.2 se puede observar un ejemplo del conteo de coches llevado a cabo en uno de estos puntos de toma de decisión con la nomenclatura utilizada en la programación.

**TABLA 4.2. CONTEO DE COCHES PARA “DIST\_SALIDA\_ROT D”**

<b>Coches que siguen por rotonda</b>	96	41%
<b>Coches que salen por As2</b>	141	59%
<b>Total contados</b>	237	100%

Todos los datos de intervalos entre llegadas y todos los conteos de vehículos están recogidos en los anexos A y B, respectivamente.

#### **4.3.3.- Ajuste de datos a distribuciones de probabilidad.**

Como se ha explicado en el apartado 2.1.1, lo ideal es tener funciones de probabilidad teóricas a las que se ajusten cada una de las variables de entrada al modelo para alimentarlo. Este apartado condensa las etapas en el proceso de ajuste de los datos que se han llevado a cabo en el estudio para las diez variables de entrada aleatorias de intervalos entre llegadas de peatones y vehículos.

##### **4.3.3.1.- Selección de datos IID**

La mayoría de las técnicas de ajuste a distribuciones teóricas presuponen que los datos son de tipo IID, por lo que se ha de explicar también el proceso de selección y de análisis de los datos obtenidos inicialmente para quedarnos en instancia final con unos datos válidos para ser sometidos a un ajuste de distribución teórico.

##### Análisis de estacionalidad y de idéntica distribución.

Existen dos tipos de sistema en cuanto a su estacionalidad: sistemas sin régimen permanente estacionario y sistemas con régimen permanente estacionario.

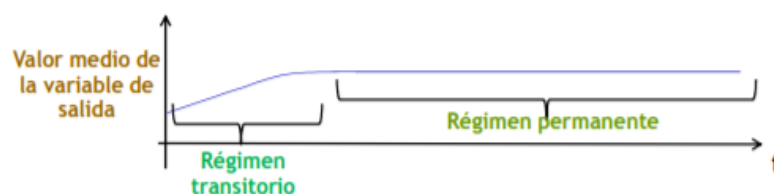


Fig. 4.10. Valor medio de la variable de salida frente al tiempo en un sistema con régimen permanente.

Fuente: [9]



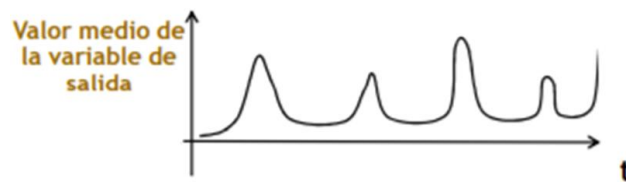


Fig. 4.11. Valor medio de la variable de salida frente al tiempo en un sistema sin régimen permanente.  
Fuente: [9]

Como puede resultar evidente, el flujo de tráfico y de peatones en nuestro sistema no es el mismo durante todas las horas del día. No obstante, durante el intervalo de tiempo del estudio se ha observado que el flujo de coches y peatones permanece aparentemente constante. Tomando esta suposición de que existe una estabilización, los valores medios de los datos que tomemos deben estar libres de tendencias. Si no lo están, significa que se han tomado datos fuera del tiempo de interés y que estos datos no son válidos. Como consecuencia, se debe hacer una selección, lo más amplia posible, de datos consecutivos sin tendencia de entre todos los datos cogidos.

De igual forma, hay que comprobar que los datos carecen de estructura y que son aleatorios dentro del rango.

Esta selección de datos se puede llevar a cabo para cada variable mediante el estudio de gráficas que representen los datos y su tendencia. En las figuras 4.12 y 4.13 se puede hacer un contraste entre la tendencia de los datos de intervalos de llegadas de la variable Pa antes y después de hacer la selección de datos válidos.

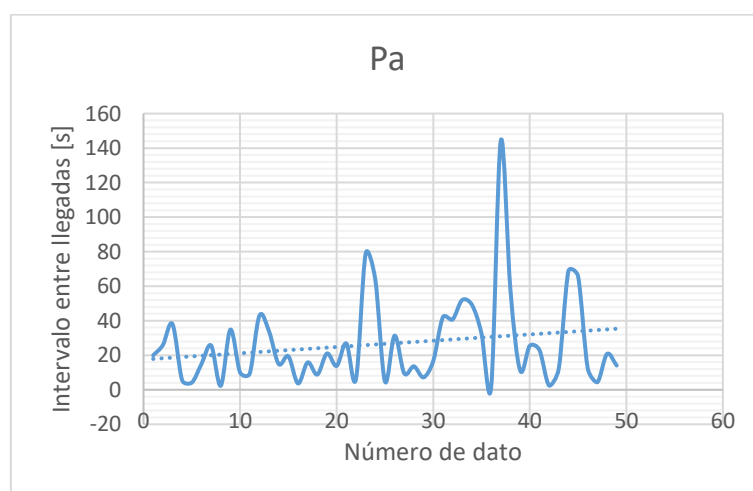


Fig. 4.12. Intervalos entre llegadas de la variable aleatoria Pa sin hacer selección de datos.

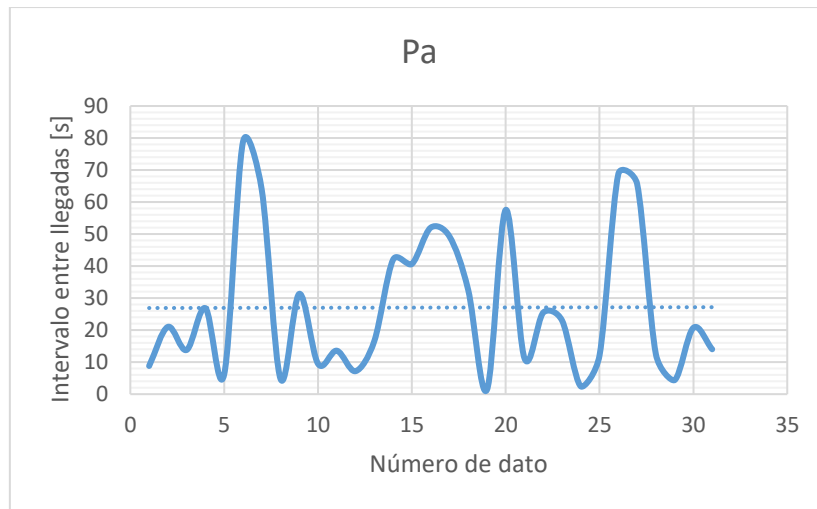


Fig. 4.13. Intervalos entre llegadas de la variable aleatoria Pa con datos seleccionados.

La selección de datos tomada tras este proceso y el resto de las gráficas utilizadas para llevarla a cabo se encuentran en el anexo 1.

#### Test de independencia.

Para realizar el ajuste de distribuciones es necesario comprobar también que los datos de cada variable son independientes, es decir, que cada dato no tiene relación con el consecutivo.

El test de independencia consiste en representar en un gráfico de dispersión a cada dato con su consecutivo (el último dato se borra por no tener consecutivo). Si los datos son independientes, no existirá ningún tipo de estructura visible en dichos gráficos.

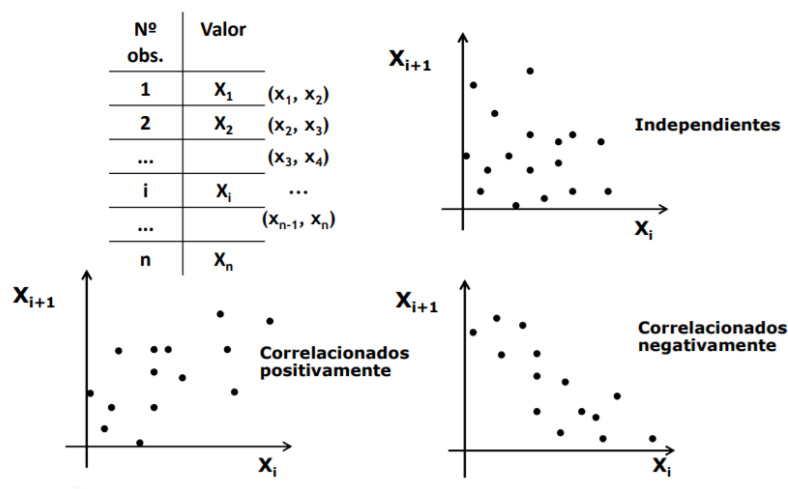


Fig. 4.13. Diferencias en los gráficos de dispersión entre datos independientes y correlacionados. Fuente: [9]

Analizando de esta manera los datos de las variables de entrada se ha podido constatar que no existe en ninguno de los diez casos estructura alguna y, por tanto, se puede concluir que los datos son independientes. Dos ejemplos se muestran a continuación.

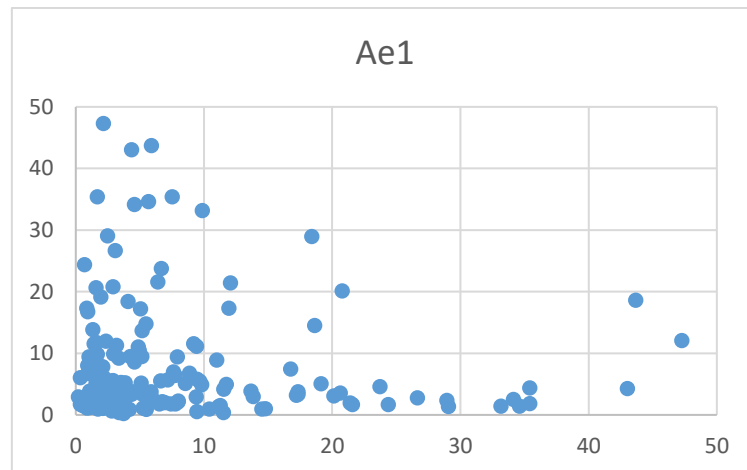


Fig. 4.14. Test de independencia para la variable aleatoria de intervalos entre llegadas por Ae1.

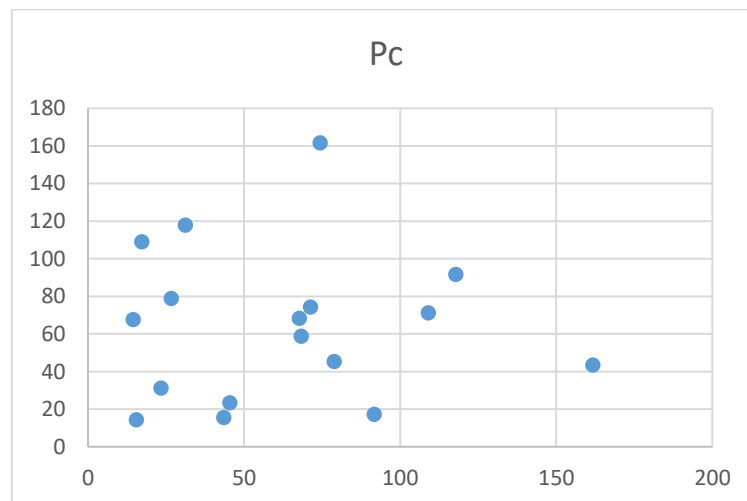


Fig. 4.14. Test de independencia para la variable aleatoria de intervalos entre llegadas por Pc.

El resto de estas pruebas de independencia los podemos encontrar en el anexo C.

#### 4.3.3.2.- Hipótesis sobre la posible distribución.

Teniendo ya unos datos IID para cada variable de entrada al modelo, hay que realizar hipótesis sobre cuál será la distribución de probabilidad teórica a la que mejor se puedan ajustar. Esta hipótesis será puesta a prueba por un criterio con el que podremos concluir si es válida o no.

Las hipótesis pueden ser planteadas observando las medidas estadísticas de los datos (máximos, mínimos, medias, varianzas...) y los histogramas que genera cada variable. Un histograma es una representación gráfica de los datos. Para crear un histograma, el rango de los datos se divide en unos intervalos iguales y se representa la frecuencia de datos en cada intervalo frente a los intervalos. Comparando el aspecto del histograma con el de distribuciones teóricas, como la exponencial, la Weibull, la triangular o la normal, y teniendo en cuenta las medidas estadísticas se plantean las hipótesis. [9]

En las figuras 4.15 y 4.16 se muestran dos ejemplos de histogramas obtenidos de los datos de las variables aleatorias de entrada, en concreto de Ae1 y de Ee1:

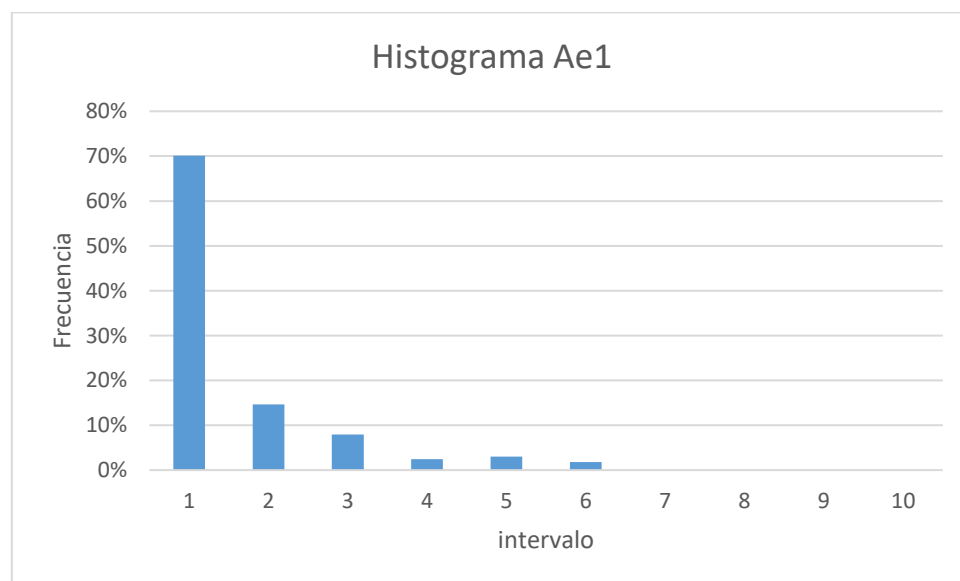


Fig. 4.15. Histograma obtenido a partir de los datos de la variable de intervalos entre llegadas por Ae1.

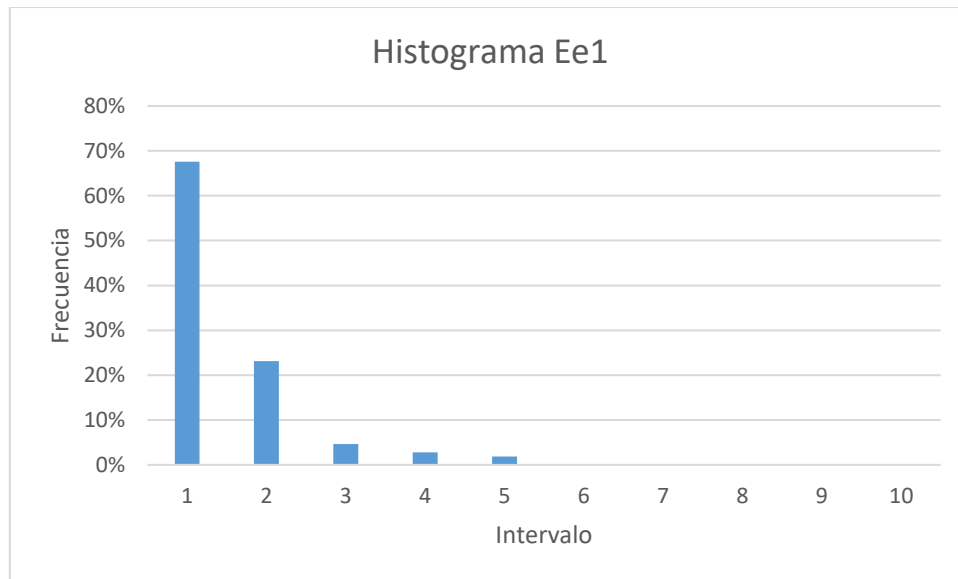


Fig. 4.16. Histograma obtenido a partir de los datos de la variable de intervalos entre llegadas por Ee1.

Según lo que se puede observar, la hipótesis más lógica es que ambos histogramas tienen una distribución exponencial.

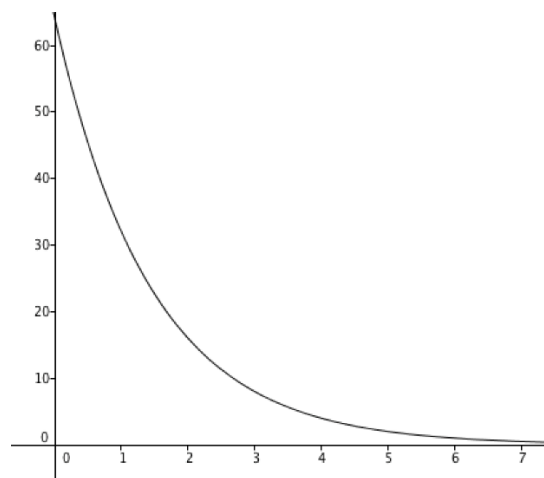


Fig. 4.17. Distribución exponencial.

El segundo paso es determinar el parámetro de la exponencial a la que se podrían ajustar los datos de cada variable. Esto se hace mediante el estimador de máxima verosimilitud, que, para cada distribución, utiliza información obtenida de la muestra de datos para seleccionar el valor del parámetro para el cuál es más probable haber observado esos datos de la muestra. [18]

En una exponencial, el valor de su media y de su desviación típica es el mismo. El valor de estos datos estadísticos en el caso de los datos de Ee1 son muy cercanos (8,88 la media y 8,75 la desviación típica) lo cual apoya la hipótesis de la exponencial. La media y la desviación típica de los datos de Ae1 distan un poco más que en el caso de Ee1 (7,97 y 9,33, respectivamente), pero siguen siendo valores considerablemente cercanos.

El estimador de máxima verosimilitud del parámetro de una exponencial es el valor medio de los datos de la muestra, quedando una **exponencial (8,88) para Ee1** y una **exponencial (7,97) para Ae1** como nuestras hipótesis a testar.

Otro ejemplo es el histograma obtenido de los datos de Be es el de la figura 4.18:

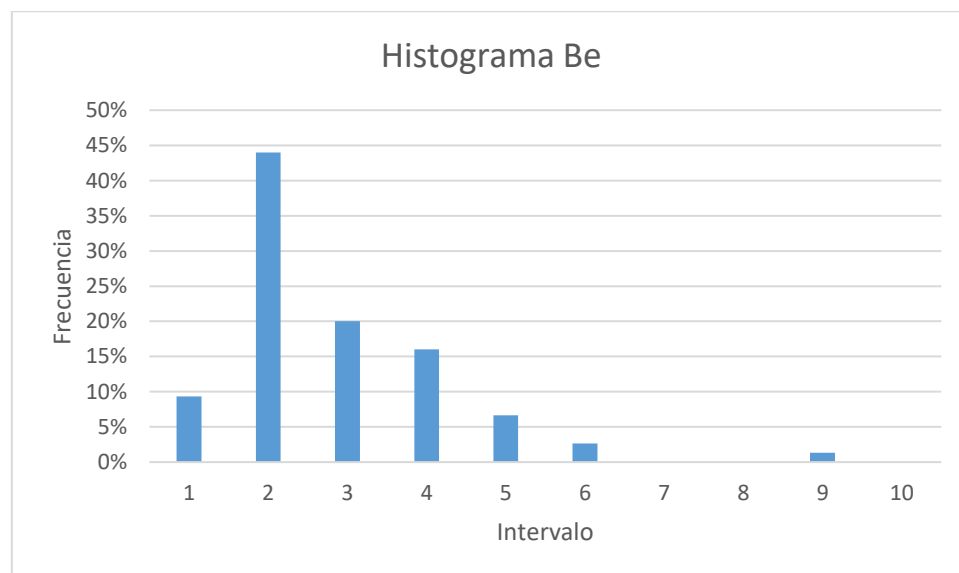


Fig. 4.18. Histograma obtenido a partir de los datos de la variable de intervalos entre llegadas por Be.

En este caso la hipótesis planteada tras juzgar el aspecto del histograma es la de que los datos provienen de una distribución Weibull ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

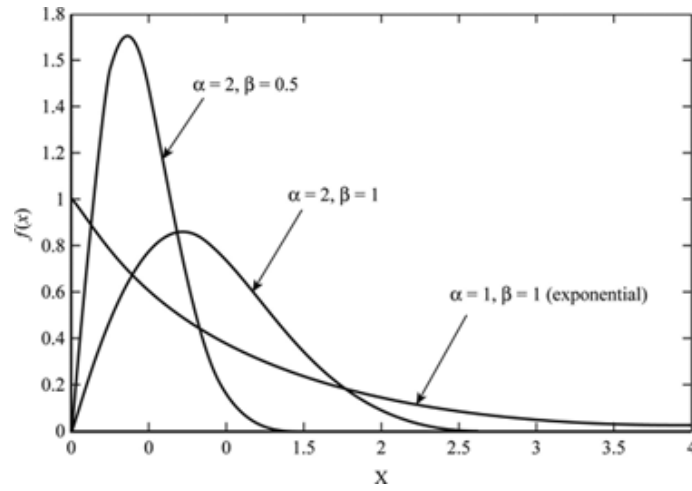


Fig. 4.19. Distribuciones Weibull. Fuente: [9]

Para estimar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  característicos de una distribución Weibull, se utilizan las expresiones relativas al estimador de máxima verosimilitud de una distribución de este tipo.

En primer lugar, se calcula  $\alpha_0$  de la siguiente manera:

$$\hat{\alpha} = \hat{\alpha}_0 = \left\{ \frac{\left( \frac{6}{\pi^2} \left[ \sum_{i=1}^n (\ln X_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln X_i \right)^2 / n \right] \right)^{-1/2}}{n-1} \right\} \quad (4.1)$$

En el caso de los datos Be, se obtiene un  $\alpha_0 = 1,911$ .

Lo siguiente es ajustar  $\alpha$  para que cumpla con la siguiente expresión:

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}} \ln X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^{\hat{\alpha}}} - \frac{1}{\hat{\alpha}} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln X_i}{n} \quad (4.2)$$

Obteniendo un  $\alpha = 1,635$ .

Por último, se estima el valor de  $\beta$  de la siguiente manera:

$$\hat{\beta} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i^{\hat{\alpha}}}{n} \right)^{1/\hat{\alpha}} \quad (4.3)$$

Para los datos Be,  $\beta = 3.342$ .

Por lo tanto, la hipótesis de distribución teórica a la que se puede ajustar la muestra de datos de Be fue la de **Weibull (1,635; 3,342)**.

Todos los histogramas, parámetros calculados y las hipótesis para cada variable están recogidas en el anexo D.

#### 4.3.3.3.- Prueba $\chi^2$

El criterio utilizado en este estudio para dar valor a las hipótesis de ajuste de distribuciones es la prueba  $\chi^2$ . Esta prueba es la más antigua de las pruebas de bondad de ajuste y una de las más extendidas. Tras realizar la prueba podremos concluir si se rechaza o si no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos de la muestra a testar son datos aleatorios IID con una función de distribución igual a la planteada. [9]

Esta prueba se basa en hacer una comparación entre frecuencias esperadas (o teóricas) y las frecuencias observadas en el experimento. Para ello, se parte de la función matemática de la distribución teórica de probabilidad de la hipótesis tomada cuyo eje independiente se divide en  $k$  intervalos equiprobables ( $k$  debe ser  $\geq 3$ ) con una probabilidad de ocurrencia  $p_i = 1/k$  de forma que  $p_1 + p_2 + \dots + p_k = 1$ . Después se calcula la frecuencia de las  $n$  observaciones que entran en cada intervalo, denominada como  $N_k$ . Por último, se calcula el valor de  $\chi^2$  experimental mediante la siguiente expresión:

$$\chi_{EXP}^2 = \sum_{k=1}^k \frac{(N_k - np_k)^2}{np_k} \quad (4.4)$$

Nótese la diferencia en el numerador entre la frecuencia observada y la esperada. Cuanto más cercanos sean estos dos valores, menor será el resultado de  $\chi_{EXP}^2$  que se compara



posteriormente con el valor  $\chi^2_{(k-1, 1-\alpha)}$ , que es el valor teórico de  $\chi^2$  que se encuentra tabulado. K-1 hace referencia a los grados de libertad y  $\alpha$  es el nivel de significación. De esta comparación se puede concluir que, siendo  $k \geq 3$ ,  $n \cdot p_k \geq 5$  y  $N_k \geq 5$ :

- Si  $\chi^2_{EXP} > \chi^2_{(k-1, 1-\alpha)}$  se rechaza la hipótesis nula.
- Si  $\chi^2_{EXP} < \chi^2_{(k-1, 1-\alpha)}$  no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula.

Volviendo al caso de Ee1, lo primero que hubo que hacer para comprobar si la hipótesis tomada pasaba la prueba de  $\chi^2$  fue dividir el eje de la función exponencial (8,88) en k intervalos equiprobables, en este caso siendo k=5. Para ello, se contó con la función de probabilidad acumulada de una exponencial:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (4.5)$$

Lo que indica la función de probabilidad acumulada es la probabilidad de que un valor de la variable x sea menor o igual que un valor x dado. Por lo tanto, para encontrar los límites de los intervalos, hubo que calcular cada x en función de la probabilidad acumulada de cada intervalo. Esta probabilidad acumulada es igual a  $k \cdot p_k$  siendo k el número de intervalo en cada caso. Para ello se despejó la variable x de la función de probabilidad acumulada.

$$x = -LN(1 - k \cdot p_k)\beta \quad (4.6)$$

Teniendo los intervalos, se calculó la frecuencia de observaciones en cada intervalo y se procedió a calcular  $\chi^2_{EXP}$ . En la tabla 4.3, se pueden ver los valores numéricos obtenidos en el test para la variable en cuestión.

**TABLA 4.3.  $\chi^2$  EXPERIMENTAL DE EE1**

Intervalo	Extremo superior	$N_k$	$\frac{(N_k - np_k)^2}{np_k}$
<b>1</b>	1.981514736	14	2.790825688
<b>2</b>	4.536131539	29	2.377981651
<b>3</b>	8.136661699	24	0.222018349
<b>4</b>	14.29180866	23	0.066055046
<b>5</b>	$\infty$	19	0.359633028

Realizando el sumatorio llegamos a que  $\chi_{EXP}^2 = 5.816513761$ . Como para una  $\alpha = 0.05$ ,  $\chi_{(4, 0.95)}^2 = 9.487729037$ , no se pudo rechazar la hipótesis nula y se ha utilizado esta función de distribución de probabilidad para alimentar al modelo con la variable Ee1.

Este proceso se ha llevado a cabo con todas las variables. En algunos casos no ha sido posible encontrar una distribución de probabilidad a la que se ajustasen los datos, con lo que se ha optado por alimentar el modelo generando en él una distribución empírica de dichas variables.

Las pruebas de  $\chi^2$  realizadas a cada una de las variables se encuentran en el anexo E.

#### **4.4.- Programación en Witness**

Una vez que ya se conoce el sistema a estudiar y se planteado un modelo conceptualmente, llega la hora de programarlo. En este subcapítulo solamente se explicarán los aspectos más relevantes del programa final del modelo dado que se valora que la parte más importante en la creación de un modelo es la parte relativa a su diseño conceptual, que ya ha sido explicada en detalle. Además, se considera que una descripción de como se ha llevado a cabo la programación en su totalidad sería demasiado larga e irrelevante.

La programación ha sido llevada a cabo por elementos discretos, como partes, cintas transportadoras, buffers, vías o vehículos, y por elementos lógicos, como variables, atributos, distribuciones o funciones. La unidad de tiempo que se ha utilizado en la programación es el segundo y la unidad de longitud, el metro.

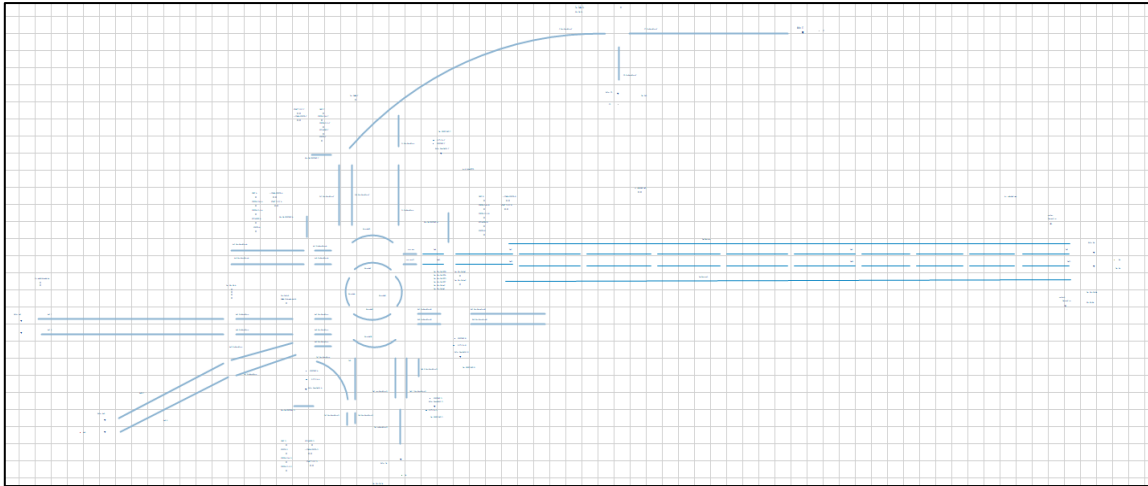


Fig. 4.20. Imagen del display del programa sin ejecutar.

Las partes nos han servido para representar cada uno de los coches o peatones que entran al modelo. Se han usado distribuciones, teóricas o empíricas dependiendo de los resultados de los ajustes de distribuciones de las variables de entrada, según las cuales cada parte ha ido siendo introducida en el modelo. También se han utilizado distribuciones (en este caso empíricas) que se ejecutan en los puntos de decisión y dictaminan a qué vía debe acceder el coche que pasa por él. Cada una de estas distribuciones relativas a eventos estocásticos han ido acompañadas de un valor entero y distinto a los demás en su programación que establece la semilla generadora de cadenas de números aleatorios que utilizará cada distribución.

Al entrar en el modelo, las partes pasan en primera estancia por un bufer. En el caso de las partes representativas de peatones, los buffers sirven como espacio de almacenamiento de las partes hasta que el semáforo se pone en verde, momento en el que las partes cruzan las hipotéticas vías y salen del modelo. En el caso de los coches, los buffers sirven para almacenarlos en caso de saturación de la hipotética carretera a la que van a entrar. Si no existieran estos buffers, en caso de intentar entrar un coche al modelo y de no poder acceder a la carretera que le corresponde, se vería rechazado por el modelo y, por tanto, la frecuencia con la que estaría entrando al modelo ya no se correspondería con la función de distribución requerida.

Las hipotéticas carreteras a las que entra una parte representativa de un coche han sido representadas mediante cintas transportadoras o mediante vías (no confundir el término vías en el contexto de programación en Witness con el término vías utilizado en el resto de la memoria para referirse a carreteras hipotéticas en general).

La mayor parte de las veces se han utilizado cintas transportadoras de tipo continuo con acumulación, que permite a las partes que están sobre ella acumularse al final de la cinta cuando esta se detiene. Cada cinta transportadora acaba en el momento en el que el coche deba respetar un semáforo o una señal de ceda el paso o cuando se encuentre con un punto de decisión. En estas situaciones y tras cumplir con las reglas programadas para cada caso, el coche accede a otra cinta transportadora distinta.

```

IF SEMAFORO_A = 0
  PUSH to As1_PostSemáforoA at Rear
ELSEIF SEMAFORO_A = 1 AND TIME - START_TIME_A > 23 AND NParts (Bufer_PasoDeCeb_A) = 0
  PUSH to As1_PostSemáforoA at Rear
ELSE
  Wait
ENDIF

```

Fig. 4.21. Ejemplo de regla de salida de una cinta transportadora en un semáforo.

Las vías han sido utilizadas para representar los carriles de entrada a la rotonda por Be, dados que estos precisaban de más detalle. Las vías transportan vehículos (elemento discreto de Witness) y los vehículos transportan las partes que representan a los coches.

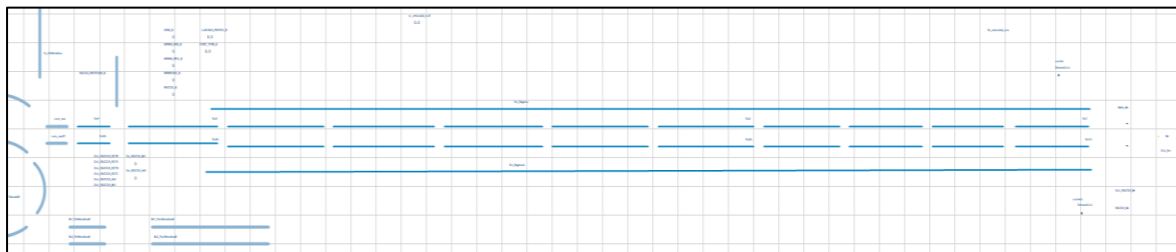


Fig. 4.22. Imagen del display de las vías vacías.

Estos vehículos realizan un circuito cerrado en el que cargan con la parte, la transportan por las diferentes vías consecutivas siguiendo las reglas de variación de las velocidades en función del número de vehículos que estén en ella, descargan la parte sobre una cinta transportadora y vuelven por una vía de regreso al principio de la serie de vías donde esperan a cargar con una nueva parte. Un ejemplo del código que regula la velocidad en cada tramo de la vía puede verse en la figura 4.23.

```

IF NVehicle (Via1b(N)) <= 2
  Atr_velocidad_vias = 8
ELSEIF NVehicle (Via2b(N)) >= 6
!
  Atr_velocidad_vias = 2.5
ELSE
  Atr_velocidad_vias = 5
ENDIF

```

Fig. 4.23. Ejemplo de código utilizado para regular la velocidad a la entrada de una vía.

A lo largo de la programación se ha hecho uso de funciones tal como “Nvehicle(vía)” que nos devuelve el número de vehículos que hay sobre la vía establecida o “Istate(cinta transportadora)”, que devuelve el estado en el que se encuentra una cinta transportadora. Esta última función ha sido utilizada en el programa para modelar las señales de ceder el paso, de forma que, por ejemplo, una parte representativa de un coche que va a entrar en la rotonda sólo puede hacerlo si la función devuelve que la cinta transportadora del tramo previo de rotonda se encuentra vacío.

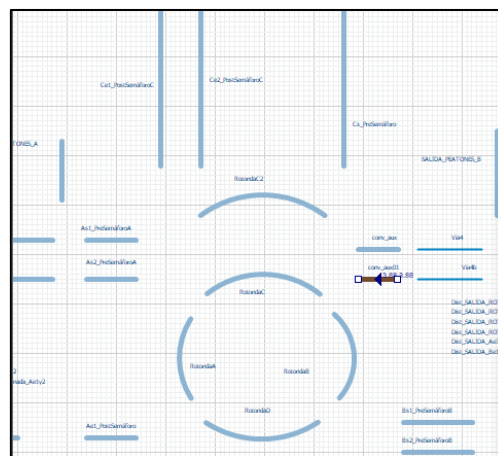


Fig. 4.24. Display de la cinta transportadora previa a la rotonda “conv\_aux01”.

```

IF IState (RotondaB) = 1
!
  PUSH to RotondaC at Rear
ELSE
  Wait
ENDIF

```

Fig. 4.25. Regla de salida de la cinta transportadora “conv\_aux01”.

Cada uno de los semáforos está regulado por una variable que varía entre 0 y 1 y cuyo valor dicta que puedan pasar peatones o coches. Cada una de estas variables está controlada por una parte a la que se ha denominado como “FICTICIA” que tiene una tasa de llegadas al modelo de un segundo y que se encarga de ir comparando en cada momento el tiempo de la simulación con los tiempos relativos al semáforo del que se encarga de controlar y de cambiar el valor de la variable en el momento oportuno.

En la figura 4.26 podemos ver un ejemplo del código implantado en una de estas partes para la regulación del semáforo. Para su comprensión, hay que saber que:

1. “SEMAFORO\_A” es la variable que regula el color del semáforo para los coches: 0 significa verde, y 1 rojo.
2. “TIME” devuelve el tiempo interno de la simulación que ha pasado desde su comienzo.
3. “START\_TIME\_A” es una variable que sirve para albergar el valor relativo al último momento del tiempo en el que el semáforo ha cambiado de color (y por lo tanto “TIME – START\_TIME\_A” es el tiempo en cada instante que ha pasado desde el último cambio de color del semáforo)
4. “PEATON\_A” es una variable que sirve para controlar la llegada de peatones al semáforo
5. “LLEGADA\_PEAON” es otra variable que recoge el tiempo transcurrido desde que cambia de color el semáforo hasta que llega el peatón.
6. “ESPERA\_MAX\_A” y “ESPERA\_MIN\_A” son variables que tienen un valor constante e igual a los tiempos de espera máxima y mínima para el peatón correspondientemente en el semáforo A.
7. “DSRC\_A” es una variable de valor constante que recoge la duración del semáforo A en rojo para los coches.

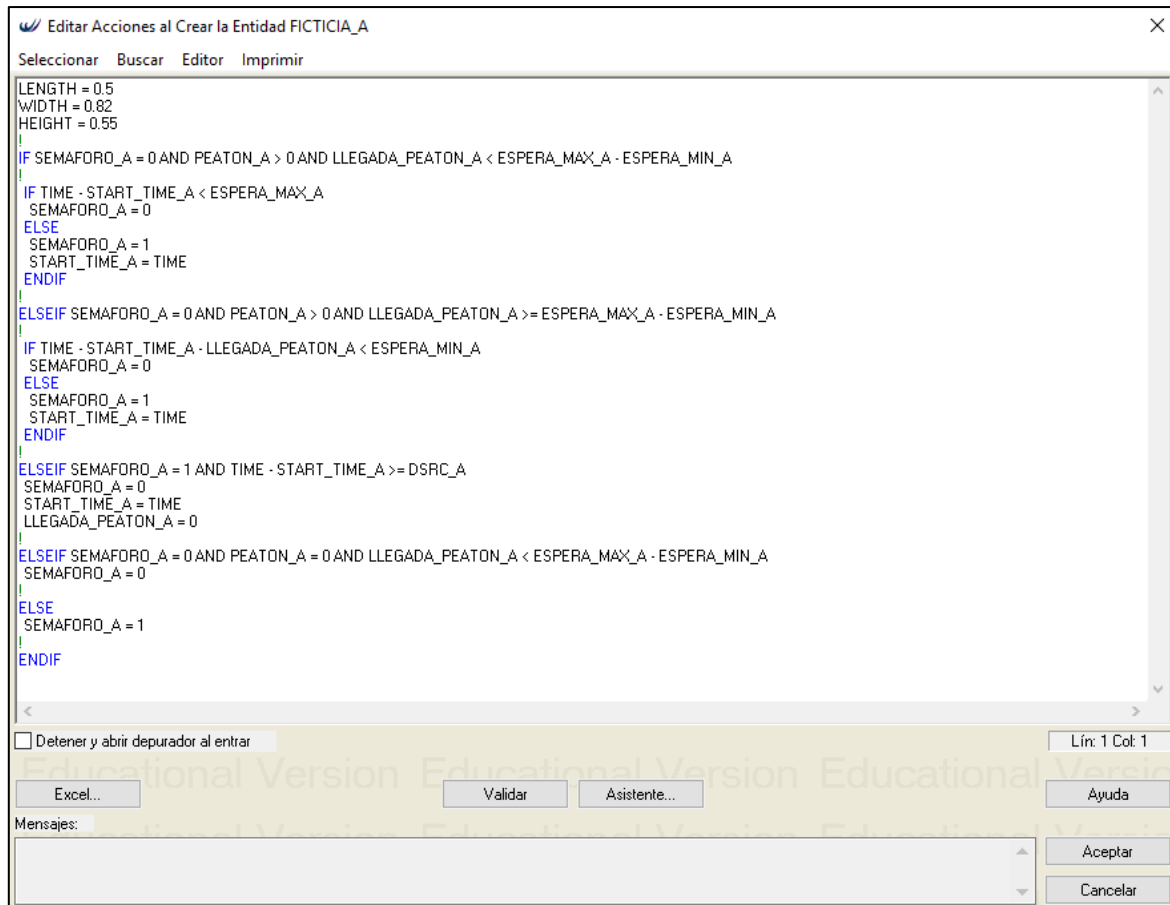


Fig. 4.26. Código de programación de la parte “FICTICIA\_A”.

Además, existen otras variables y algunos atributos que sirven para regular el tránsito de las partes por las distintas carreteras ficticias. Como ejemplo de esto, el atributo “SALIDA\_Ae” es un atributo que toma valores de entre 1 y 4 según una distribución empírica y que se vinculan a las partes que entran por Ae1 y por Ae2 para distribuirlas entre los cuatro carriles siguientes en función de a donde se dirijan.

```

IF SALIDA_Ae = 1
PUSH to Ds1_PreSemáforo at Rear
ELSE
IF SALIDA_Ae = 2
PUSH to Ae3_PreSemáforo at Rear
ELSE
IF SALIDA_Ae = 3 AND NParts (Ae1_PreSemáforo) > NParts (Ae2_PreSemáforo)
PUSH to Ae2_PreSemáforo at Rear, Ae1_PreSemáforo at Rear
ELSE
IF SALIDA_Ae = 3 AND NParts (Ae1_PreSemáforo) <= NParts (Ae2_PreSemáforo)
PUSH to Ae1_PreSemáforo at Rear, Ae2_PreSemáforo at Rear
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF

```

Fig. 4.27. Regla de salida para la cinta transportadora “Ae1\_1”.

Por último, cabe mencionar que el display de las partes representativas de vehículos ha sido modificado para que tengan forma de coche y su color varía según la carretera por la que entren al modelo. Esto facilita mucho el seguimiento visual de los coches cuando se pone en marcha la simulación. El display de las partes representativas de peatones también se ha modificado.

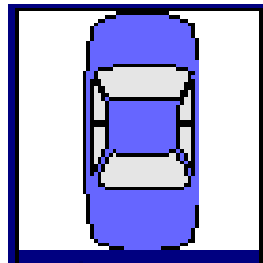


Fig. 4.28. Display de una parte representativa de un vehículo.

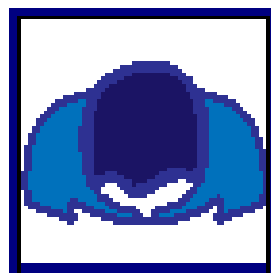


Fig. 4.29. Display de una parte representativa de un peatón.

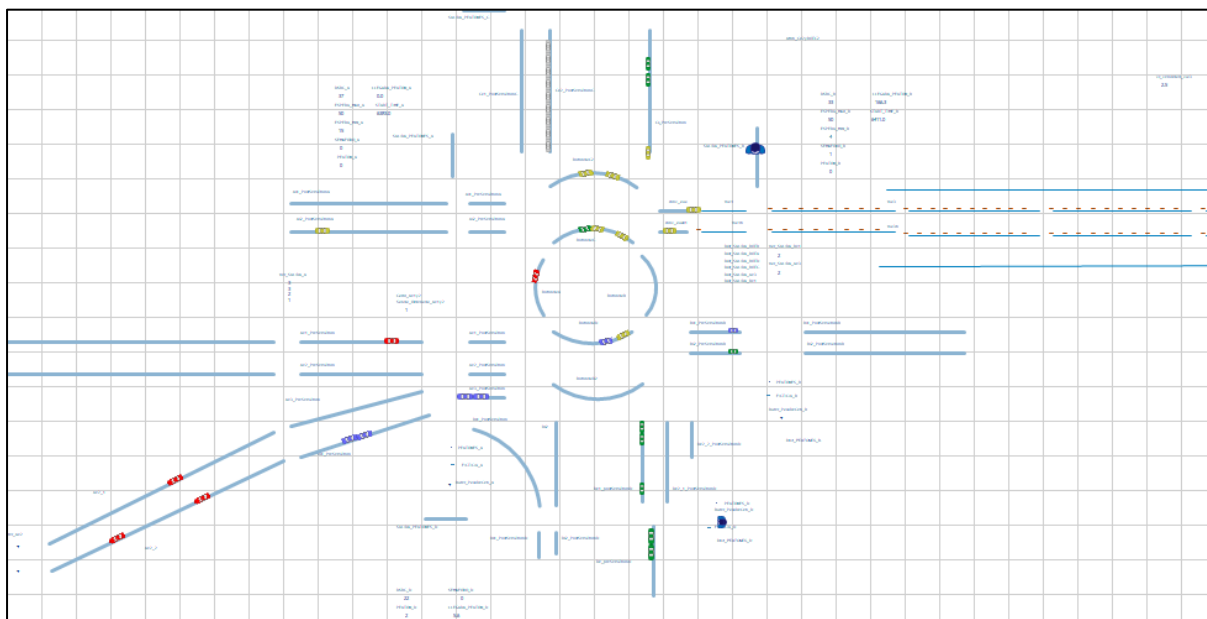


Fig. 4.30. Display del modelo durante una simulación.



#### **4.5.- Verificación.**

El proceso de verificación es un proceso de análisis continuo durante la programación. La verificación está presente desde la etapa de aprendizaje en la programación con Witness, en la que se debe comprobar constantemente si las hipótesis planteadas sobre el funcionamiento de los diferentes elementos de programa son ciertas. Durante la etapa de programación, se ha de verificar el funcionamiento de cada uno de los detalles que intervienen en el programa para garantizar que la traducción del modelo conceptual al matemático se ha hecho de forma correcta.

Existen diversas técnicas de verificación de un programa informático de un modelo de simulación. A continuación, se repasan algunas de las utilizadas en este estudio. [7]

La primera, y quizás una de las más recurrentes, es la de utilizar un enfoque modular en la programación. Si se escribe el programa entero sin hacer uso de subprogramas en los que se verifica el funcionamiento de aspectos concretos, hay una alta probabilidad de que cuando se ejecute el programa no funcione. En este estudio, se han hecho uso de un gran número de subprogramas en los que se experimentaba con elementos de Witness o con fragmentos de código específicos antes de implementarlos en el modelo. Por citar algunos ejemplos, los semáforos, las funciones, aspectos concretos sobre el funcionamiento de vías y cintas transportadoras o el funcionamiento de atributos han sido testados en subprogramas antes de formar parte del modelo matemático.

Otra técnica utilizada es la de ir de lo sencillo a lo complicado. Cuanto más sencillo es el programa y menos elementos tiene, más fácil es de comprobar su correcto funcionamiento. A la hora de comprobar cómo se comportaban las vías y los vehículos de Witness, por ejemplo, se comenzó probando un sistema muy sencillo con una vía y pocos vehículos y se fue haciendo más complejo sucesivamente hasta llegar a lo necesitado por el modelo.

Otra de las técnicas más utilizadas en este estudio es la de usar indicadores o registros de la actividad de algún elemento de la programación del que queremos verificar el funcionamiento. En la programación del modelo se ha hecho un uso constante de variables de control que mostraban el valor en cada instante de la simulación de los elementos lógicos.

Por otra parte, se han operado partes del programa bajo hipótesis simplificadas, como en caso de los semáforos y los peatones, a los que se les proporcionó una tasa de llegadas constante. Se comprobó que lo que sucedía era lo mismo que se había predicho previamente. Este

proceso se repitió varias veces con tasas de llegada distintas. Utilizando la tasa de llegadas real habría resultado mucho más complicado realizar una predicción.

Witness cuenta con un sistema de animación (el display) que también puede servir como técnica de verificación. Aunque no es recomendable utilizar esta técnica para verificar detalles con precisión, sí tiene gran utilidad para alertar en caso de que el programa tenga grandes fallos de funcionamiento.

Por último, el hecho de que Witness sea un programa informático de simulación implica que la cantidad de programación necesaria sea mucho menor que en caso de utilizar un lenguaje de programación general. Esto reduce la probabilidad de cometer errores y en definitiva contribuye a que la traducción del modelo conceptual sea la correcta.

#### **4.6.- Experimentación, análisis de resultados y validación del modelo básico.**

La experimentación llevada a cabo sobre el modelo básico ha consistido en realizar veinte simulaciones variando el valor de cada semilla en cada una de ellas para poder tener en cuenta la variabilidad del sistema en cada una de las replicaciones independientes. En todas las repeticiones se han dejado 5000 segundos de tiempo de calentamiento para que se empezasen a recoger los datos estadísticos en el momento de la simulación en el que se alcanzase un nivel de saturación en el modelo análogo al que existe en el sistema real durante la hora punta. Los datos han sido recogidos por Witness durante 2000 segundos de la simulación (algo más de media hora) que es el tiempo aproximado durante el que dura el atasco en el sistema. Esta metodología de experimentación es la que se aplica a modelos de los que se quieren extraer resultados durante un régimen transitorio, como en el caso de este estudio.

Cada simulación ha generado un dato de cada una de las variables de salida tomadas, por lo que se tienen veinte datos en total de cada una de ellas. En general, la mejor representación de una variable de salida es su media estimada acompañada de alguna medida que cuantifique su nivel de dispersión. En este estudio, se utiliza como medida de dispersión el intervalo de confianza para la media, que permite definir el rango de valores entre los que se encuentra el valor real de la media de nuestra variable (tras haber estimado la media a partir de la muestra) con un grado de incertidumbre preestablecido. Por ejemplo, el intervalo de confianza de 95% de una media obtenida a partir de los datos de una muestra indica los

valores entre los que estará el valor real de la media con una probabilidad de equivocación del 5%. [19]

Una de las formas más fiables de obtener un intervalo de confianza para la media de una población aun en casos en los que el tamaño de la muestra es reducido es a través de la distribución de probabilidad normal t de Student mediante la siguiente expresión:

$$\bar{x}_n + t_{n-1,1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s_{n-1}^2}{n}} \quad (4.7)$$

Siendo  $\alpha$  el nivel de significación,  $n$  el número de datos,  $S_{n-1}^2$  la varianza de la muestra y  $t_{n-1,1-\alpha/2}$  el punto crítico  $1 - \alpha/2$  superior de la distribución t con  $n-1$  grados de libertad. [7]

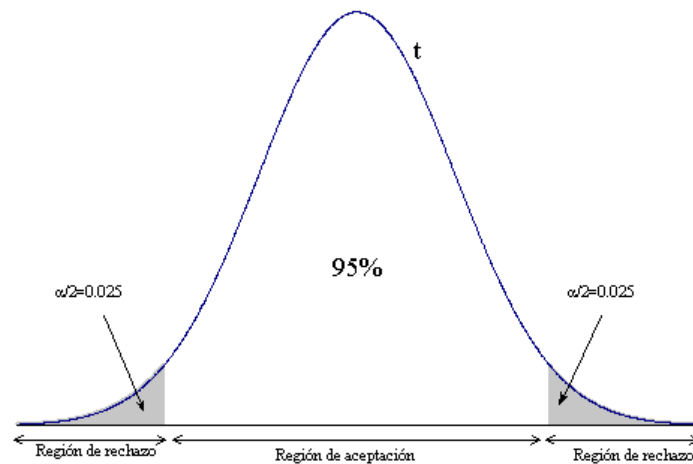


Fig. 4.31. Regiones de aceptación y rechazo de una distribución t para un  $\alpha=0,05$

Por otro lado, para casos como en el de este estudio en los que se quiere observar más de una variable de salida, se cumple que, siendo  $k$  el número de variables de salida que se quieren observar e  $I_k$  los intervalos de confianza con nivel de significación  $\alpha_k$  para la media de cada variable  $k$ , la probabilidad de que todos los intervalos  $I_k$  contengan las medias  $\mu_k$  de las variables correspondientes es:

(4.8)

$$P(\mu_k \in I_k \text{ para todo } k = 1, 2, \dots, k) \geq 1 - \sum_{k=1}^k \alpha_k$$

Esto quiere decir, que para conseguir una confianza global de  $\alpha$  se deben construir los intervalos individuales con:

$$\alpha_k = \alpha/k \quad (4.9)$$

Tras experimentar con el modelo base se han obtenido los resultados que se encuentran en la tabla 4.4 de las cinco variables de salida estudiadas:

1. Tiempo medio que pasa en el modelo una parte que entra por Be
2. Tiempo medio que pasa una parte sobre la cinta transportadora de acceso a la rotonda por C “E\_PostsemáforoE”
3. Tiempo medio que pasa una parte sobre una de las cintas transportadoras de acceso a la rotonda por A “Ae1\_1”
4. Tiempo medio que pasa una parte sobre otra de las cintas transportadoras de acceso a la rotonda por A “Ae2\_1”
5. Tiempo medio que pasa una parte sobre la cinta transportadora de acceso a la rotonda por D “De\_PresemáforoD”

**TABLA 4.4. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON MODELO BÁSICO**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “Ae1_1” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “Ae2_1” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “De_PresemaforoD” [s]</b>
1	385,53	49,68	12,56	9,30	14,54
2	421,36	49,53	12,42	9,23	14,03
3	391,02	48,56	12,46	9,28	13,14
4	402,01	60,36	12,52	9,30	14,06
5	402,12	56,18	12,47	9,34	14,42
6	394,46	66,88	12,48	9,28	13,58
7	438,26	48,65	12,53	10,04	15,62
8	437,43	55,74	13,06	9,93	14,71
9	390,22	69,43	12,51	9,31	13,26
10	394,18	45,80	12,68	9,21	13,79
11	437,05	51,75	17,40	10,89	16,82
12	393,75	55,29	12,52	9,30	15,19
13	384,98	126,60	12,47	9,38	13,26
14	376,85	51,13	12,49	9,30	13,40
15	392,66	50,69	12,46	9,27	14,11
16	412,16	48,56	12,51	9,23	14,15
17	404,33	51,62	12,52	9,28	14,80
18	357,95	54,14	12,51	9,30	13,33
19	387,85	49,10	12,53	9,30	13,75
20	379,03	80,98	13,15	9,32	15,39

Para un  $\alpha$  global de 0,05, dado que k es 2, el nivel de significación de cada uno de los dos intervalos será de:

$$\alpha_k = \frac{0,05}{5} = 0,01 \quad (4.10)$$

Dado que el número de datos es de diez para cada variable y que:

$$1 - \frac{0,01}{2} = 0,995 \quad (4.11)$$

Obtenemos una  $t_{(19; 0,995)}$  de 2,861.

Con estos datos se han podido obtener los siguientes intervalos para cada variable de salida con una confianza global del 95%:

**TABLA 4.5. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DEL MODELO BÁSICO**

	Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]	Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]	Tiempo medio de una parte sobre “Ae1_1” [s]	Tiempo medio de una parte sobre “Ae2_1” [s]	Tiempo medio de una parte sobre “De_PresemaforoD” [s]
<b>Media estimada</b>	399,16	58,53	12,81	9,44	14,27
<b>Desviación típica estimada</b>	21,170	18,193	1,096	0,404	0,948
<b>Varianza estimada</b>	448,179	331,001	1,201	0,163	0,898
<b>Tolerancia</b>	13,543	11,639	0,701	0,258	0,606
<b>Intervalo. Extremo inferior</b>	385,617	46,895	12,111	9,182	13,661
<b>Intervalo. Extremo superior</b>	412,703	70,172	13,513	9,698	14,874

Como se ha ido explicando a lo largo del capítulo, el proceso de validación se ha llevado a cabo de forma constante durante todo el proceso de creación del modelo, generando cambios en él hasta llegar al modelo base en cuestión. A continuación, se explica la última etapa de este proceso en la que se le ha dado validez al modelo.

Con los intervalos obtenidos, se puede realizar una comparación entre los valores medios de las variables de salida del modelo y los datos obtenidos durante el análisis y la recogida de datos en el sistema real.

El tiempo que permanecía un vehículo atascado que entraba por “Be” en el sistema real era de entre seis y ocho minutos (entre 360 y 480 segundos) aproximadamente, con lo que el intervalo obtenido para la primera de las variables de salida es válido.

Por otro lado, los intervalos obtenidos para las variables tres, cuatro y cinco corresponden a tiempos medios de tránsito sobre cintas transportadoras que representan carreteras en las que el tráfico es fluido en el sistema real. En los tres casos, los valores que encierran los intervalos son valores de tiempo que reflejan, teniendo en cuenta la velocidad y la longitud de cada cinta transportadora, que no hay atasco sobre ninguna de ellas y que las partes pasan por ellas con fluidez tal y como se espera que suceda.

En el caso de la segunda variable de salida, los valores de tiempo medio sobre la cinta transportadora “E\_PostsemáforoE” que se han obtenido son perfectamente coherentes con lo que sucede en el sistema en el tramo de carretera análogo, cuyo nivel de atasco es moderado y depende de las circunstancias puntuales del sistema.

Por último, durante el tiempo en el que ha transcurrido la simulación, se ha podido comprobar que el número de partes representativas de vehículos que se encontraban sobre las vías de entrada por Be en todo momento excedía el valor de 400, lo cual concuerda con lo observado durante la toma de datos.

Todos estos factores han permitido concluir que el modelo es una representación válida del sistema real teniendo en cuenta los objetivos del estudio.

## 5.- ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE MEJORA

En este capítulo se explica qué modelos alternativos se han decidido implementar para comprobar si con alguno de ellos se alcanzan los objetivos, así como la forma en la que han sido programados y los cálculos que nos han permitido llegar a resultados analíticos de los que poder extraer conclusiones.

### 5.1.- Definición e implementación de las alternativas.

Se han probado cinco configuraciones del modelo distintas al básico:

- Primera alternativa.

La primera alternativa implementada es la de crear el carril auxiliar desde el tramo final de Be hasta Cs como ha sido explicado en el epígrafe 4.1.

La manera en la que se ha llevado a cabo la programación de esta alternativa ha sido añadiendo una cinta transportadora para que hiciese la función de esta vía desviando las entidades de vehículos por ella hasta la cinta transportadora de salida por C, donde tendrían que ceder el paso antes de acceder a esta.

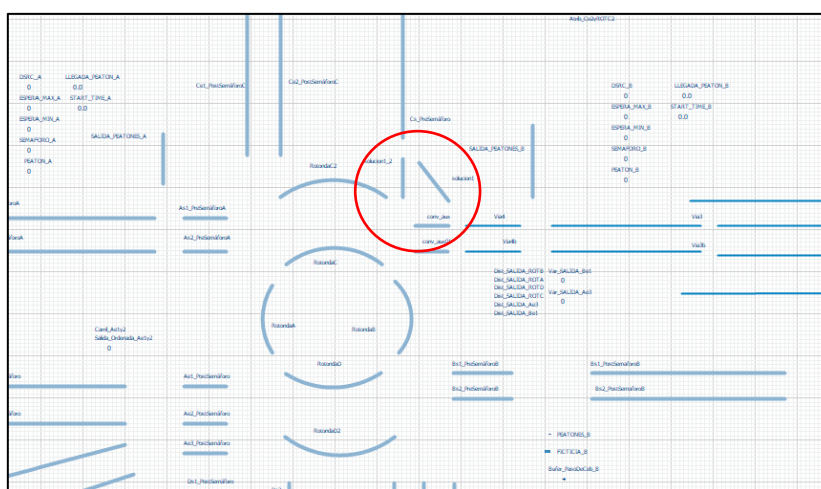


Fig. 5.1. Programación de la primera alternativa en Witness.



- Segunda alternativa.

Consiste simplemente en disminuir la duración del semáforo B en verde para los peatones desde 33 segundos a 25. Se ha elegido el valor de 25 segundos porque se considera que con ese tiempo se puede cruzar la vía B. El semáforo D, por ejemplo, posee un tiempo de cruce de 19 segundos, siendo el ancho de la vía a cruzar algo más corto que en el caso de B.

La programación de esta alternativa es muy sencilla, ya que solo se necesita cambiar el valor de la variable que alberga este tiempo.

- Tercera alternativa

La tercera alternativa consiste en aplicar la primera y la segunda alternativa conjuntamente.

- Cuarta alternativa

Esta alternativa consiste en la construcción de una pasarela para peatones que quieran cruzar el brazo B de la rotonda como se ha explicado en el subcapítulo 4.1.

En cuanto a la programación de esta alternativa, solamente hace falta cambiar la regla de salida de los vehículos en la vía previa al semáforo B para que envíen a los vehículos a la siguiente vía independientemente del estado del semáforo.

- Quinta alternativa.

Consiste en combinar la primera alternativa con la cuarta alternativa.

## **5.2.- Resultados y comparación con el modelo base.**

Se ha realizado el mismo proceso de experimentación con cada uno de los modelos alternativos. Tras observar el funcionamiento del modelo en cada una de estas configuraciones, se ha tomado la decisión de hacer una selección de las dos variables cuyos intervalos de confianza se calcularán en cada caso y que servirán para hacer una comparativa de las alternativas con el modelo base y sacar conclusiones. Las dos variables de salida que se han elegido han sido:

1. Tiempo medio que pasa en el modelo una parte que entra por Be. Esta variable servirá para comparar el nivel de atasco entre las alternativas y el modelo base en las vías de entrada por B.
2. Tiempo medio que pasa una parte sobre la cinta transportadora de acceso a la rotonda por C “E\_PostsemáforoE”. Con esta variable se comparará el nivel de repercusión que puedan tener cada una de las alternativas sobre el flujo del tráfico en la zona de entrada a la rotonda por C en el modelo.

En las siguientes tablas, se muestran los datos de las dos variables de salida obtenidos en las simulaciones y los intervalos de confianza calculados a partir de ellos con un nivel de confianza global del 95% para cada una de las alternativas. Para los cinco casos:

$$\alpha_k = \frac{0,05}{2} = 0,025 \quad (5.1)$$

$$1 - \frac{0,025}{2} = 0,9875 \quad (5.2)$$

Con lo que obtenemos una  $t_{(19; 0,9875)}$  de 2,433 para cada intervalo.

## Primera alternativa

**TABLA 5.1. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA PRIMERA ALTERNATIVA**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
1	282,45	47,74
2	300,44	47,17
3	280,47	61,87
4	309,88	62,42
5	290,34	46,53
6	291,46	50,40
7	325,54	47,90
8	324,48	104,76
9	267,41	48,99
10	300,81	46,09
11	278,21	59,59
12	267,26	61,02
13	286,45	47,75
14	242,09	52,37
15	255,85	48,12
16	293,91	49,42
17	296,62	80,74
18	296,84	47,88
19	247,47	47,76
20	334,91	49,63

**TABLA 5.2. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA PRIMERA ALTERNATIVA**

	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
<b>Media estimada</b>	288,65	55,41
<b>Desviación típica estimada</b>	24,876	14,396
<b>Varianza estimada</b>	618,839	207,257
<b>Tolerancia</b>	13,536	7,834
<b>Intervalo. extremo inferior</b>	302,181	63,241
<b>Intervalo. extremo superior</b>	275,109	47,574

## Segunda alternativa

**TABLA 5.3. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA SEGUNDA ALTERNATIVA**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
1	214,41	274,23
2	229,25	202,54
3	163,27	252,69
4	198,41	283,79
5	200,05	200,02
6	207,72	239,60
7	242,51	154,46
8	208,33	276,65
9	204,34	297,04
10	199,69	227,62
11	192,83	313,03
12	168,56	342,89
13	241,73	211,06
14	156,24	344,08
15	171,42	281,59
16	232,40	273,19
17	199,92	320,86
18	215,60	253,15
19	133,36	276,57
20	286,30	141,24

**TABLA 5.4 CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA SEGUNDA ALTERNATIVA**

	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
<b>Media estimada</b>	203,32	258,32
<b>Desviación típica estimada</b>	34,675	56,117
<b>Varianza estimada</b>	1202,360	3149,114
<b>Tolerancia</b>	18,868	30,535
<b>Intervalo. extremo inferior</b>	222,184	288,851
<b>Intervalo. extremo superior</b>	184,449	227,781

### Tercera alternativa

**TABLA 5.5. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA TERCERA ALTERNATIVA**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
1	131,48	52,01
2	142,21	131,81
3	105,04	287,73
4	116,38	79,39
5	130,56	66,83
6	136,91	265,02
7	178,05	74,48
8	165,90	102,59
9	127,82	280,88
10	115,00	73,54
11	115,30	285,11
12	99,74	124,29
13	146,15	188,32
14	113,88	124,55
15	113,68	69,37
16	158,84	111,74
17	144,29	56,54
18	119,44	259,24
19	103,11	75,99
20	195,16	57,23

**TABLA 5.6. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA TERCERA ALTERNATIVA**

	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
<b>Media estimada</b>	132,95	138,33
<b>Desviación típica estimada</b>	25,850	87,656
<b>Varianza estimada</b>	668,218	7683,558
<b>Tolerancia</b>	14,066	47,697
<b>Intervalo. extremo inferior</b>	147,013	186,028
<b>Intervalo. extremo superior</b>	118,881	90,635

#### Cuarta alternativa

**TABLA 5.7. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA CUARTA ALTERNATIVA**

<b>Repetición</b>	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
1	138,66	90,61
2	136,83	95,74
3	97,40	312,68
4	124,89	308,47
5	109,70	217,64
6	108,11	314,37
7	144,21	237,87
8	132,77	308,06
9	101,26	318,13
10	101,19	166,33
11	95,34	176,50
12	94,65	252,27
13	128,65	140,22
14	174,87	136,96
15	105,79	298,15
16	94,21	309,25
17	141,69	281,62
18	89,72	379,43
19	115,21	318,36
20	136,71	209,69

**TABLA 5.8. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA CUARTA ALTERNATIVA**

	<b>Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]</b>	<b>Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]</b>
<b>Media estimada</b>	118,59	243,62
<b>Desviación típica estimada</b>	22,619	84,667
<b>Varianza estimada</b>	511,625	7168,451
<b>Tolerancia</b>	12,308	46,070
<b>Intervalo. extremo inferior</b>	130,901	289,688
<b>Intervalo. extremo superior</b>	106,285	197,548

## Quinta alternativa

**TABLA 5.9. DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON LA QUINTA ALTERNATIVA**

Repetición	Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]	Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]
1	88,89	216,40
2	84,88	48,87
3	83,44	82,61
4	101,35	73,42
5	88,75	67,75
6	98,29	91,11
7	84,77	50,55
8	92,80	227,05
9	84,25	75,71
10	80,58	49,34
11	88,07	74,56
12	80,37	51,43
13	82,10	47,86
14	81,80	68,05
15	82,05	66,20
16	107,05	54,07
17	81,86	49,26
18	86,71	99,26
19	82,57	47,98
20	122,31	57,74

**TABLA 5.10. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE LAS VARIABLES DE SALIDA DE LA QUINTA ALTERNATIVA**

	Tiempo medio en modelo de una parte que entra por “Be” [s]	Tiempo medio de una parte sobre “E_PostsemáforoE” [s]
Media estimada	89,14	79,96
Desviación típica estimada	10,682	50,818
Varianza estimada	114,104	2582,516
Tolerancia	5,812	27,652
Intervalo. extremo inferior	94,957	107,613
Intervalo. extremo superior	83,332	52,309

A continuación, se han de comparar las dos variables de diferentes alternativas con las del modelo base. Para ello, se ha de definir una variable  $\xi$  de diferencia entre los resultados obtenidos en el modelo base y los obtenidos en cada alternativa para las dos variables de salida. Se tendrán entonces cinco variables de diferencia para la primera variable de salida ( $\xi_{1,i}$ ) y cinco para la segunda ( $\xi_{2,i}$ ): [7]

$$\xi_{1,1} = X_{\text{base}} - X_{\text{alternativa1}} \quad (5.3)$$

$$\xi_{1,2} = X_{\text{base}} - X_{\text{alternativa2}} \quad (5.4)$$

$$\xi_{1,3} = X_{\text{base}} - X_{\text{alternativa3}} \quad (5.5)$$

$$\xi_{1,4} = X_{\text{base}} - X_{\text{alternativa4}} \quad (5.6)$$

$$\xi_{1,5} = X_{\text{base}} - X_{\text{alternativa5}} \quad (5.7)$$

$$\xi_{2,1} = Y_{\text{base}} - Y_{\text{alternativa1}} \quad (5.8)$$

$$\xi_{2,2} = Y_{\text{base}} - Y_{\text{alternativa2}} \quad (5.9)$$

$$\xi_{2,3} = Y_{\text{base}} - Y_{\text{alternativa3}} \quad (5.10)$$

$$\xi_{2,4} = Y_{\text{base}} - Y_{\text{alternativa4}} \quad (5.11)$$

$$\xi_{2,5} = Y_{\text{base}} - Y_{\text{alternativa5}} \quad (5.12)$$

En la siguiente tabla se recogen los valores de cada una de estas variables de diferencia:



**TABLA 5.11. VARIABLES DE DIFERENCIA ENTRE MODELO BASE Y ALTERNATIVAS**

Repetición	Alternativa 1 vs modelo base		Alternativa 2 vs modelo base		Alternativa 3 vs modelo base		Alternativa 4 vs modelo base		Alternativa 5 vs modelo base	
	$\xi_{1,1}$	$\xi_{2,1}$	$\xi_{1,2}$	$\xi_{2,2}$	$\xi_{1,3}$	$\xi_{2,3}$	$\xi_{1,4}$	$\xi_{2,4}$	$\xi_{1,5}$	$\xi_{2,5}$
1	103,07	1,94	171,11	-224,54	254,04	-2,33	246,86	-40,93	296,64	-166,72
2	120,92	2,36	192,11	-153,01	279,15	-82,28	284,53	-46,21	336,49	0,66
3	110,55	-13,31	227,75	-204,14	285,98	-239,17	293,62	-264,13	307,59	-34,05
4	92,13	-2,06	203,60	-223,43	285,63	-19,03	277,11	-248,11	300,66	-13,06
5	111,78	9,65	202,07	-143,84	271,57	-10,65	292,43	-161,46	313,37	-11,57
6	103,00	16,48	186,74	-172,72	257,55	-198,14	286,35	-247,48	296,17	-24,23
7	112,72	0,75	195,75	-105,82	260,21	-25,83	294,05	-189,23	353,49	-1,90
8	112,95	-49,02	229,10	-220,91	271,53	-46,85	304,66	-252,31	344,63	-171,30
9	122,81	20,44	185,88	-227,61	262,40	-211,44	288,96	-248,70	305,97	-6,28
10	93,37	-0,29	194,50	-181,82	279,19	-27,74	293,00	-120,53	313,60	-3,54
11	158,84	-7,83	244,22	-261,28	321,75	-233,35	341,71	-124,74	348,98	-22,81
12	126,49	-5,73	225,19	-287,60	294,00	-69,00	299,10	-196,98	313,38	3,86
13	98,53	78,85	143,24	-84,46	238,83	-61,72	256,32	-13,62	302,87	78,73
14	134,76	-1,24	220,61	-292,95	262,97	-73,42	201,98	-85,83	295,05	-16,92
15	136,80	2,57	221,24	-230,90	278,98	-18,68	286,86	-247,46	310,60	-15,51
16	118,25	-0,86	179,76	-224,64	253,31	-63,18	317,95	-260,70	305,11	-5,52
17	107,71	-29,12	204,41	-269,24	260,04	-4,92	262,64	-230,00	322,47	2,37
18	61,10	6,26	142,35	-199,01	238,50	-205,10	268,23	-325,29	271,24	-45,12
19	140,38	1,34	254,49	-227,47	284,74	-26,89	272,63	-269,26	305,28	1,12
20	44,13	31,35	92,74	-60,26	183,87	23,76	242,33	-128,71	256,72	23,24

Después se debe de obtener un intervalo de confianza para cada variable de diferencia. Si el intervalo de confianza para una de estas variables incluye al valor 0 entonces no se considera que exista evidencia de que los dos sistemas difieran, mientras que, si excluye al 0, significa que los dos sistemas son distintos con el nivel de confianza fijado. Como son diez los intervalos de confianza que se han de crear, para obtener una confianza global del 95% ( $\alpha = 0,05$ ):

$$\alpha_k = \frac{0,05}{10} = 0,005 \quad (5.13)$$

$$1 - \frac{0,005}{2} = 0,9975 \quad (5.14)$$

Con lo que obtenemos una  $t_{(19; 0,9975)}$  de 3,174 para cada intervalo.

Los intervalos de confianza para cada variable se encuentran en la tabla 5.12:

**TABLA 5.12. CÁLCULO DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LAS VARIABLES DE DIFERENCIA**

	Alternativa 1 vs modelo base		Alternativa 2 vs modelo base		Alternativa 3 vs modelo base		Alternativa 4 vs modelo base		Alternativa 5 vs modelo base	
	$\xi_{1,1}$	$\xi_{2,1}$	$\xi_{1,2}$	$\xi_{2,2}$	$\xi_{1,3}$	$\xi_{2,3}$	$\xi_{1,4}$	$\xi_{2,4}$	$\xi_{1,5}$	$\xi_{2,5}$
<b>Media estimada</b>	110,51	3,13	195,84	-199,78	266,21	-79,80	280,57	-185,08	310,02	-21,43
<b>Desviación típica estimada</b>	25,99	24,47	38,06	63,96	27,44	86,09	29,71	89,46	23,67	56,17
<b>Varianza estimada</b>	675,64	598,57	1448,66	4091,07	753,15	7412,20	882,95	8003,67	560,15	3154,67
<b>Tolerancia</b>	18,45	17,36	27,01	45,39	19,48	61,10	21,09	63,49	16,80	39,86
<b>Intervalo. extremo inferior</b>	128,96	20,49	222,85	-154,39	285,69	-18,70	301,65	-121,60	326,81	18,43
<b>Intervalo. extremo superior</b>	92,07	-14,24	168,83	-245,17	246,74	-140,90	259,48	-248,57	293,22	-61,29

En resumen, se puede afirmar con un 95% de confianza, que el valor medio de tiempo que pasa en el modelo una parte que entra por Be es menor en todas las alternativas que el valor de  $399,16 \pm 13,54$  segundos obtenido en el modelo base:

- Alternativa 1:  $288,65 \pm 13,54$  segundos
- Alternativa 2:  $203,32 \pm 18,87$  segundos
- Alternativa 3:  $132,95 \pm 14,07$  segundos
- Alternativa 4:  $118,59 \pm 12,31$  segundos
- Alternativa 5:  $89,14 \pm 5,81$  segundos

En cuanto al valor del tiempo medio que pasa una parte sobre la cinta transportadora de acceso a la rotonda por C, se puede afirmar con un 95% de confianza que en las siguientes alternativas tiene un valor mayor que el de  $58 \pm 11,64$  segundos obtenido en el modelo base:

- Alternativa 2:  $258,32 \pm 30,53$  segundos
- Alternativa 3:  $138,33 \pm 47,70$  segundos
- Alternativa 4:  $243,62 \pm 46,07$  segundos

Como se puede observar, todas las alternativas producen mejoras considerables sobre el tráfico en Be. Sin embargo, tres de las cinco alternativas tienen efectos negativos en el desarrollo del flujo vial en la entrada a la rotonda por C. De estas tres alternativas, la alternativa tres es la que trae menos consecuencias perjudiciales.

La mejor alternativa en vista de los resultados es la quinta, ya que reduce el valor de la primera variable de salida a menos de un cuarto de su valor en el modelo base, y no tiene efectos perjudiciales sobre otras variables del modelo.

## 6.- VALORACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se describen los costes derivados de la realización del estudio de simulación y se hace una estimación del coste resultante de implementar cada una de las alternativas de mejora.

### 6.1.- Costes del proyecto

Entre los costes derivados del proyecto podemos encontrar:

- **Personal:** en relación con los honorarios que reciben las personas directamente implicadas en la realización del proyecto.
- **Equipos:** costes que derivan del uso de equipos en la realización del estudio. Incluye las cinco cámaras utilizadas durante la recogida de datos y el ordenador y las licencias de software utilizadas. El coste imputable en este caso no tiene por qué ser igual al de compra.
- **Subcontratación de tareas:** en este proyecto fue necesaria la contratación de dos personas en el proceso de toma de datos durante aproximadamente 3 horas cada una.
- **Otros:** recoge el resto de los costes directos derivados del proyecto como transporte o material fungible. Se ha estimado que suponen un 10% del total de los costes del proyecto.

En las siguientes tablas se recogen los presupuestos necesarios para la realización del proyecto:

**TABLA 6.1. COSTES**

COSTE DE PERSONAL			
Descripción	Horas [h]	Coste horario [€/h]	Coste imputable [€]
Ingeniería	300	60	18.000
Redacción	100	20	2.000
TOTAL PERSONAL	400	-	20.000
COSTE DE EQUIPOS			
Descripción		Coste [€]	Coste imputable [€]
Ordenador		1.000	500
Cámaras de video (x4)		400	200
Licencia Microsoft Office		240	80
Licencia Witness Profesional		2.000	750
TOTAL EQUIPOS		3.640	1.530
COSTE DE SUBCONTRATACIÓN			
Descripción	Horas [h]	Coste horario [€/h]	Coste imputable [€]
Personal para filmación (x2)	6	10	60
OTROS COSTES			
Descripción			Coste imputable [€]
Resto de costes (10%)			2.159
TOTALES			
SUBTOTAL			23.749 €
21% IVA			4.987,29 €
TOTAL			28.736,29 €

## 6.2.-Costes de implementación de las alternativas.

Además del coste del estudio, implementar cada alternativa costaría lo siguiente:

### Alternativa 1:

Implementar la alternativa 1 tendría el coste de la obra necesaria para crear el carril auxiliar. Se ha estimado que este coste estaría en torno a 20.000 euros.

### Alternativa 2:

La más barata, solamente tiene el coste de una hora de programación del semáforo, en torno a 30 euros

**Alternativa 3:**

Al ser una suma de la primera y la segunda alternativa, costaría aproximadamente 20.030 euros implementarla.

**Alternativa 4:**

Tendría el coste asociado a la creación de una pasarela. Se ha estimado que podría costar en torno a 100.000 euros.

**Alternativa 5:**

Como es una suma entre las alternativas uno y cinco, se le atribuye un coste de implementación de unos 120.000 euros.

## **7.-CONCLUSIONES**

Tras la realización del estudio de simulación del sistema vial en cuestión, se puede concluir que la situación actual del sistema no resulta óptima para el flujo de tráfico en el tramo de la Avenida los Almendros en la hora punta de la mañana. Esto implica que existen soluciones de mejora para este problema que afecta a cientos de vehículos.

La experimentación sobre el modelo ha aportado información cuantitativa concluyente sobre factores clave que intervienen en el desarrollo del tráfico del sistema. El denso tráfico que llega por Be se puede reducir mediante la variación de parámetros del semáforo de B, o mediante su desaparición, pero provoca una redistribución de parte del tráfico lento a las vías que llegan a la rotonda por C. La creación del carril auxiliar soluciona en parte este problema. Teniendo en cuenta esta información, se han diseñado cinco alternativas que producirían una mejora notoria en cuanto al evidente problema que existe en el sistema.

Pese a esto, dependiendo de los intereses y del presupuesto para esta clase de asuntos del que dispone el ayuntamiento de Rivas-Vaciamadrid, unas soluciones pueden resultar más atractivas que otras.

Sin limitaciones de presupuesto, la opción que cumple los objetivos de forma más evidente es la quinta alternativa, según la cual habría que construir una pasarela y una vía auxiliar para que la Avenida los Almendros quede prácticamente libre de retenciones y las vías de llegada por C no se vean afectadas. Además, esta solución supondría un impacto positivo en el medio ambiente, ya que la disminución del tráfico provocaría una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Si el presupuesto es muy escaso, la segunda opción (modificar un parámetro del semáforo) sería la más llamativa. Aunque el tráfico global del sistema no variaría demasiado, se produciría una redistribución evitando que ninguna vía sufriese atascos exagerados.

## 8.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Matriculaciones de coches en agosto: 48,7% de crecimiento”, carnovov.com, 03-09-2018. [En línea]. Disponible en: <https://carnovo.com/es/guias/matriculaciones-agosto-2018/>.
- [2] “En agosto se vendieron más turismos en España”, datosmacro.expansion.com, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/negocios/matriculaciones-vehiculos/espana>.
- [3] Xavier Fageda y Ricardo Flores-Fillol, “Atascos y contaminación en grandes ciudades: Análisis y soluciones”, Fedea, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://documentos.fedea.net/pubs/fpp/2018/05/FPP2018-04.pdf>.
- [4] “Anuario estadístico de accidentes 2016”, Dirección General de Tráfico, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes/Anuario-accidentes-2016.pdf>.
- [5] Borja Moreno, “Ingeniería de tránsito y sus herramientas de modelización”, Eadic, 27-01-2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.eadic.com/ingenieria-de-transito-y-sus-herramientas-de-modelizacion/>.
- [6] J.W. Schmidt y R.E. Taylor, *Simulation and Analysis of Industrial systems*, 1<sup>st</sup> ed. Homewood, Illinois: Irwin, 1970.
- [7] Averill M. Law y W. David Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, 3<sup>rd</sup> ed. Boston: McGraw Hill, 1982.



[8] George S. Fishman y Philip J. Kiviat, *The statistics of discrete-event simulation*, vol. 10, nº 4, pp. 185-195, Abril 1968.

[9] Material docente “Métodos cuantitativos de organización II”, Ingeniería mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017.

[10] “Variables arbitrarias independientes e idénticamente distribuidas”, es.knowledger.de. [En línea]. Disponible en:

<http://es.knowledger.de/0410993/VariablesArbitrariasIndependientesEIidenticamenteDistribuidas>.

[11] “Witness Horizon”, Lanner, 2018. [En línea]. Disponible en:

<https://www.lanner.com/en-gb/technology/witness-simulation-software.html>.

[12] Miguel Ortega y Álvaro García Sánchez, “Primeros pasos con Witness”, Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid. [En línea]. Disponible en: <http://iol.etsii.upm.es/arch/PrimerosPasos.pdf>

[13] “Rivas en cifras”, rivasciudad.es, 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.rivasciudad.es/portal/contenedor\\_rivasencifras.jsp?language=es&codResi=1](http://www.rivasciudad.es/portal/contenedor_rivasencifras.jsp?language=es&codResi=1).

[14] “Hacia los 100.000 vecinos”, abc.es, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.abc.es/informacion/especial-rivas/urbanistico.asp>

[15] Eduardo cano, “¿Qué son las turbo rotondas? Todo lo que tienes que saber”, autopista.es, 12-07-2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.autopista.es/noticias-motor/articulo/turbo-rotondas-que-son-ventajas-tipos>.

[16] “Cambios en la rotonda de Los Almendros”, rivasciudad.es, 05-06-2014. [En línea].

Disponible en:

[http://www.rivasciudad.es/portal/contenedor\\_ficha.jsp?seccion=s\\_fnot\\_d4\\_v1.jsp&contenido=22146&nivel=1400&tipo=8](http://www.rivasciudad.es/portal/contenedor_ficha.jsp?seccion=s_fnot_d4_v1.jsp&contenido=22146&nivel=1400&tipo=8).

[17] Alejandro Alcalde López, “Regulación semafórica dinámica en la plaza Francesc Macià de Barcelona”, Trabajo fin de máster, Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012. [En línea]. Disponible en:

<https://docplayer.es/21553407-Regulacion-semaforica-dinamica-en-la-plaza-francesc-macia-de-barcelona-1.html>.

## 9.- ANEXOS

### ANEXO A: Datos utilizados

(Todos los datos están en segundos)

**TABLA A.1**

Intervalos entre llegadas por Ae1			
1,65	1,08	1,91	4,95
6,53	7,63	2,35	10,43
1,76	6,96	11,96	0,93
5,89	1,96	17,33	6,69
3,76	19,14	3,77	23,74
4,37	5,05	0,7	4,59
3,35	17,21	24,37	34,14
9,2	3,18	1,68	2,5
11,55	11,28	9,82	2,81
4,18	1,5	4,89	0,66
0,87	9,67	11,01	1,45
17,33	5,49	8,88	11,53
3,36	14,79	6,75	0,37
1,99	1,02	2,12	6,03
1,08	7,94	2,12	2,48
3,85	9,4	7,79	29,08
5,19	2,92	1,78	1,35
3,38	20,79	3,25	13,85
0,36	20,13	1,68	2,95
1,74	3,09	35,42	9,87
0,95	26,65	4,37	33,18
8,01	2,78	43,04	1,43
2,26	1,15	4,27	6,64
5,91	1,18	9,48	5,51
43,69	7,19	5,8	0,9
18,64	5,69	2,27	1,09
14,53	34,62	2,02	1,19
0,94	1,41	4,59	3,74
16,76	1,59	8,56	0,21
7,44	20,64	5,11	2,9
1,76	3,53	5,16	5,57
7,76	3,82	9,46	1,86
6,41	1,59	0,54	7,98
21,58	4,09	1,52	2,1
1,68	18,41	1,6	1,05
2,72	28,94	5,18	9,42
2,53	2,37	13,68	11,12
4,43	2,15	3,87	1,31
3,76	47,28	1	7,54
3,53	12,08	1,61	35,42
5,25	21,4	11,74	1,83

**TABLA A.2**

Intervalos entre llegadas por Ae1			
4,99	14,52	23,29	14,87
7,98	3,8	1,53	24,89
9,18	17,4	15,75	23,47
30,85	29,86	4,54	43,62
14,51	5,33	4,89	3,21
16,84	46,94	2,45	3,04
7,55	18,82	7,54	0,82
3,58	10	1,94	3,19
18,38	3,19	1,38	17,73
13,76	25,89	21,22	17,49
14,19	2,46	23,68	3,19
2,39	32,5	5,87	2,4
0,52	20,75	23,91	12,25
50,45	2,19	24,44	18,04
2,37	28,16	2,89	
5,95	20,66	2,56	

**TABLA A.3**

Intervalos entre llegadas por Be			
3,8	1,28	6,23	3,23
1,87	4,91	4,32	1,72
2,07	5,69	2,43	3,14
2,2	2,03	1,97	4,58
2,43	4,69	0,29	1,2
1,86	1,34	1,81	4,5
2,08	2,97	2,27	3,65
2,15	2,03	4,11	2,36
1,92	1,85	1,15	3,38
0,8	1,33	2,56	1,29
1,82	4,53	1,91	4,24
2,09	5,71	1,95	1,2
3,26	10,33	0,54	3,57
2,19	4,31	2,04	5,69
2,97	12	6,8	1,36
3,27	0,21	2,41	1,87
1,59	4,63	2,41	
4	5,47	1,97	
3,48	1,41	3,34	
1,66	2,23	2,15	

**TABLA A.4**

Intervalos entre llegadas por De			
10,68	15,57	2,2	12,04
1,65	25,94	6,31	50,34
52,99	3,32	8,24	17,58
3,25	4,7	4,2	39,68
11,18	3,33	2,16	2,36
13,31	3,66	3,59	8,26
12,33	4,95	2,36	11,57
1,83	11	1,8	5,98
1,94	2,21	10,32	8,95
22,16	1,45	3,31	35,35
35,73	7,64	3,2	2,34
1,92	23,46	4,92	3,99
10,23	25,7	2,84	38,09
3,14	5,47	2,01	1,96
4,67	2,48	2,5	5,41
4,13	16,79	37,21	5,88
4,12	3,42	11,24	2,68
1,76	1,46	6,14	2,15
1,6	4,06	11,97	
37,13	42,66	12,43	

**TABLA A.5**

Intervalos entre llegadas por Ee1			
6,29	1,83	11,89	7,23
16,24	6,17	11,57	2,56
4,62	1,78	10,86	18,28
1,97	5,73	2,68	9,44
5,4	13,95	1,97	1,54
2,16	3,41	4,91	8,02
12,05	15,32	15,88	2,03
4,4	11,59	8,9	2,16
2,68	2,27	1,47	1,49
5,25	4,89	12,15	7,27
4,46	3,3	2,91	4,64
7,87	4,37	31,09	23,51
1,96	13,58	7,82	10,92
30,14	15,77	5,34	5,17
17,63	4,26	23,96	1,34
18,23	2,42	5,54	5,7
21,83	48,53	1,96	9,82
8,51	6,2	2,29	2,12
13,1	3,26	21,77	3,73
3,61	1,27	15,2	11,62
2,12	11,31	12,12	12,03
4,39	3,28	11,81	3,54
3,35	6,65	1,47	9,62
5,22	1,97	5,43	5,85
3,92	1,82	10,25	6,09
3,44	33,19	9,48	
3,19	4,5	20,18	
8,71	16,36	49,55	

**TABLA A.6**

Intervalos entre llegadas por Ee2			
18,62	22,39	25,9	33,56
9,39	129,93	2,31	138,28
128,64	32,64	12,96	31,15
55,41	49,4	78,75	2,94
63,16	20,44	22,02	85,81

**TABLA A.7**

<b>Intervalos Pd</b>	<b>Intervalos Pb</b>	<b>Intervalos Pc</b>	<b>Intervalos Pa</b>
28,61	145,32	26,75	8,8
87,34	6,85	78,91	21,02
9,87	160,81	45,43	13,8
131,28	230,66	23,41	26,85
52,27	203,56	31,22	6,16
15,47	319,37	117,86	78,75
35,62	6,94	91,71	63,89
52,13	103,81	17,29	4,8
11,6		109,06	31,33
14,62		71,31	9,48
121,99		74,39	13,57
12,35		161,73	7,18
69,74		43,49	16,6
60,69		15,53	42,02
49,58		14,48	40,66
		67,7	51,99
		68,37	49,29
		58,77	32,55
			1,36
			57,55
			11,2
			25,48
			23,01
			2,43
			12,16
			68,75
			65,71
			12,47
			4,38
			20,74
			14,01

## ANEXO B: Conteo de vehículos en puntos de decisión

**TABLA B.1**

<b>Dist_SALIDA_Ae</b>		
total coches por Ae	315	
coches por ds1	69	0,22
coches por Ae1y2(carril interior rotonda)	142	0,45
coches por Ae3	104	0,33
siguen por rotondaD	94	0,904 de ae3
salen por ds2	10	0,096 de ae3

**TABLA B.2**

<b>Dist_SALIDA_De</b>		
total coches por De	101	
coches por De1	91	90%
coches por De1 que salen por Bs1	0	
coches por De2 que salen por Bs2	10	10%

**TABLA B.3**

<b>Dist_SALIDA_ROT</b>		
siguen por rotonda	34	0,28
Salen por ds2 (recto)	86	0,72
total contados	120	

**TABLA B.4**

<b>Dist_SALIDA_ROT</b>		
siguen por rotonda	21	0,18
salen por As2 (recto)	96	0,82
total contados	117	

**TABLA B.5**

<b>Dist_SALIDA_ROT</b>		
siguen por rotonda	96	0,41
Salen por Bs1 (recto)	141	0,59
total contados	237	



**TABLA B.6**

<b>Dist_SALIDA_ROT B</b>		
siguen por rotonda	97	0,64
Salen por Cs (recto)	55	0,36
total contados	152	

**TABLA B.7**

<b>Dist_SALIDA_Be1</b>		
siguen por rotonda (recto)	158	0,68
Salen por Cs	73	0,32
total contados	231	

**TABLA B.8**

<b>Dist_SALIDA_Ce</b>		
Van a carril Ce1(y salen por Bs1)	46	0,4
Van a carril Ce2	70	0,6
total contados	116	

**TABLA B.9**

<b>Dist_SALIDA_Ce2</b>
todos siguen por rotonda (recto)

## ANEXO C: Selección de datos IID

### Análisis de estacionalidad

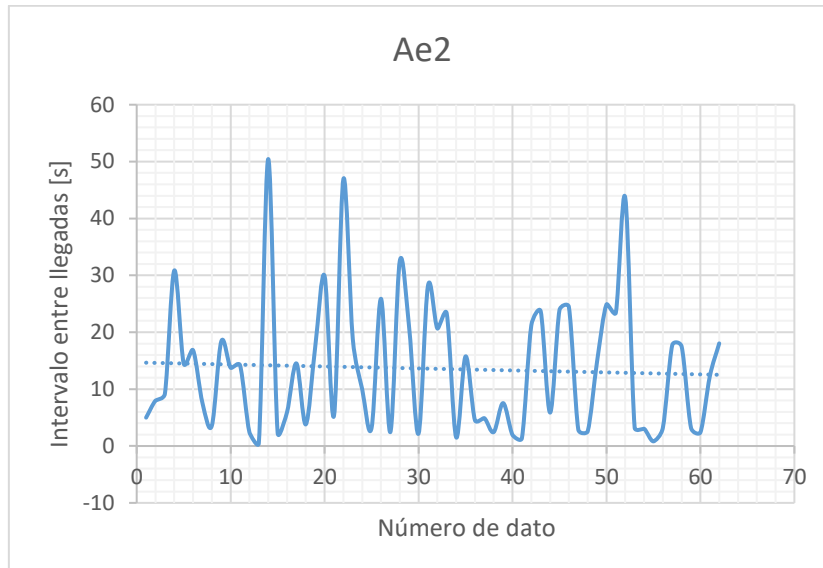


Fig. C.1. Estacionalidad de datos de Ae2.

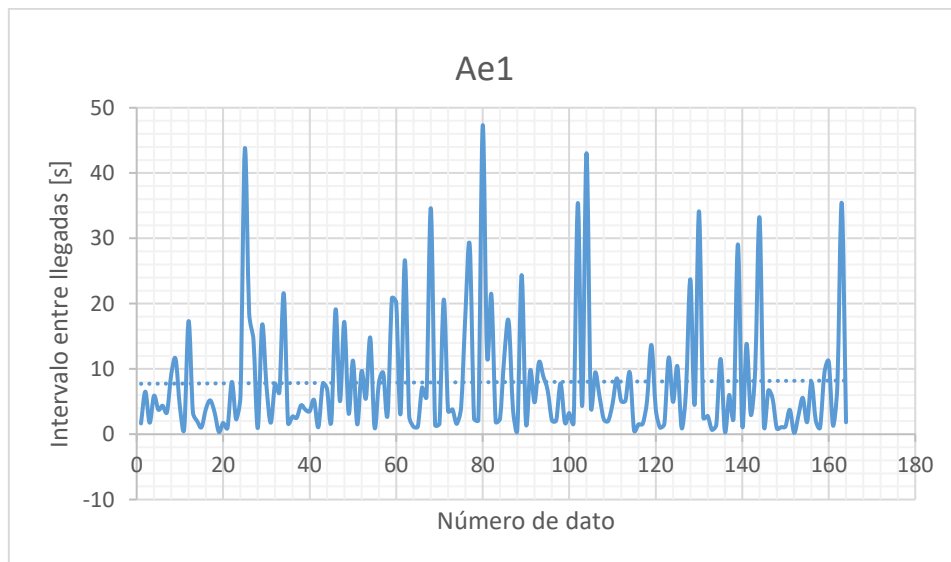


Fig. C.2. Estacionalidad de datos de Ae1.

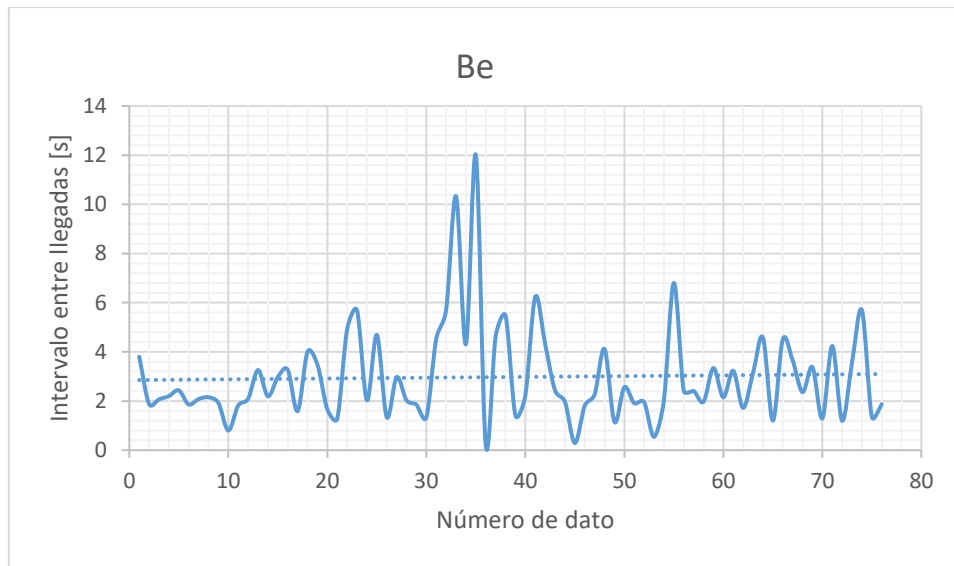


Fig. C.3. Estacionalidad de datos de Be.

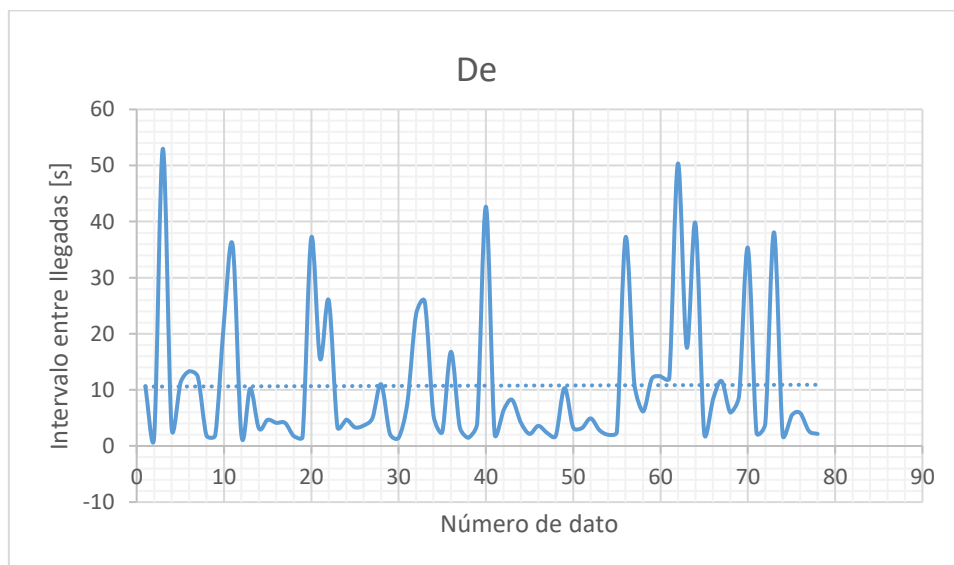


Fig. C.4. Estacionalidad de datos de De.



Fig. C.5. Estacionalidad de datos de Pd.

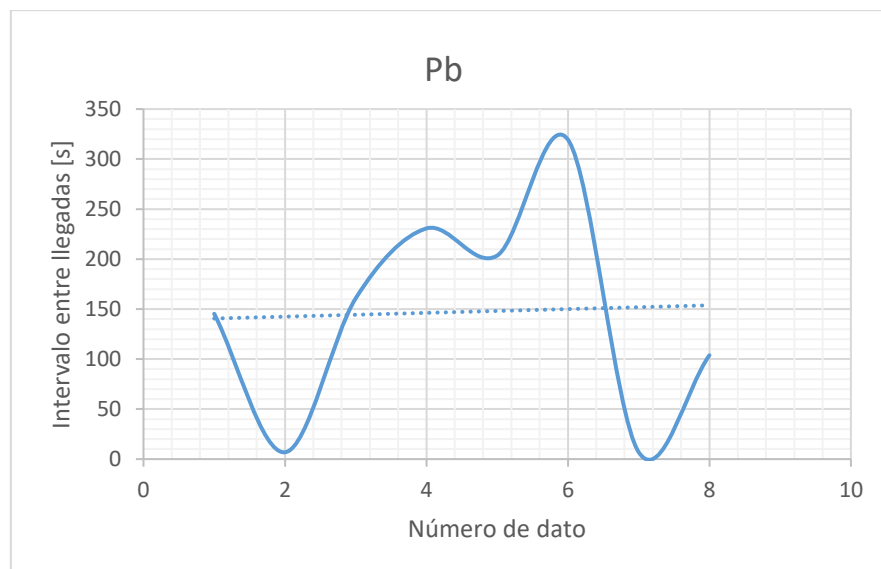


Fig. C.6. Estacionalidad de datos de Pb.

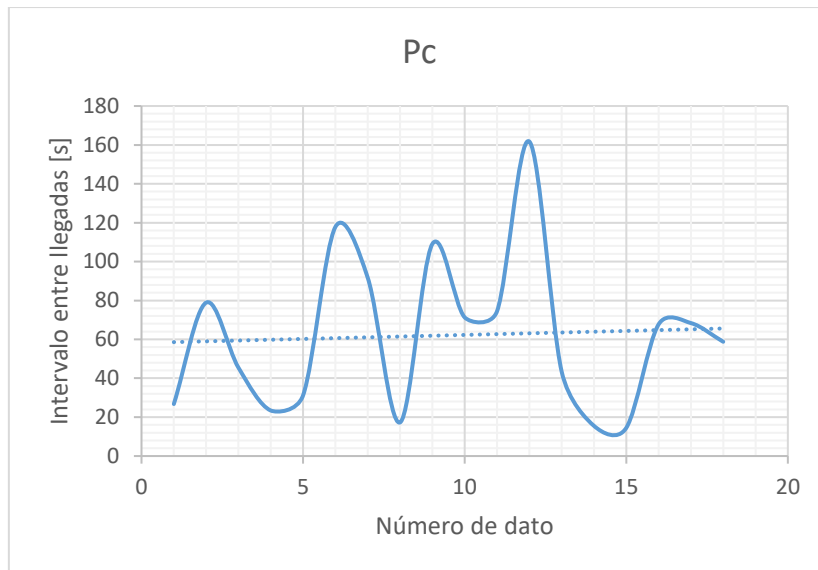


Fig. C.7. Estacionalidad de datos de Pc.

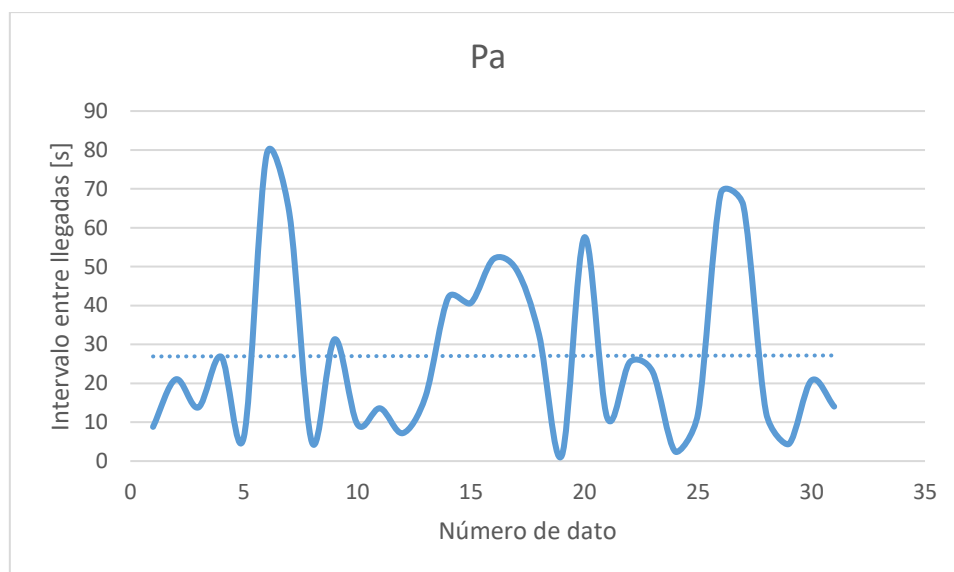


Fig. C.8. Estacionalidad de datos de Pa.

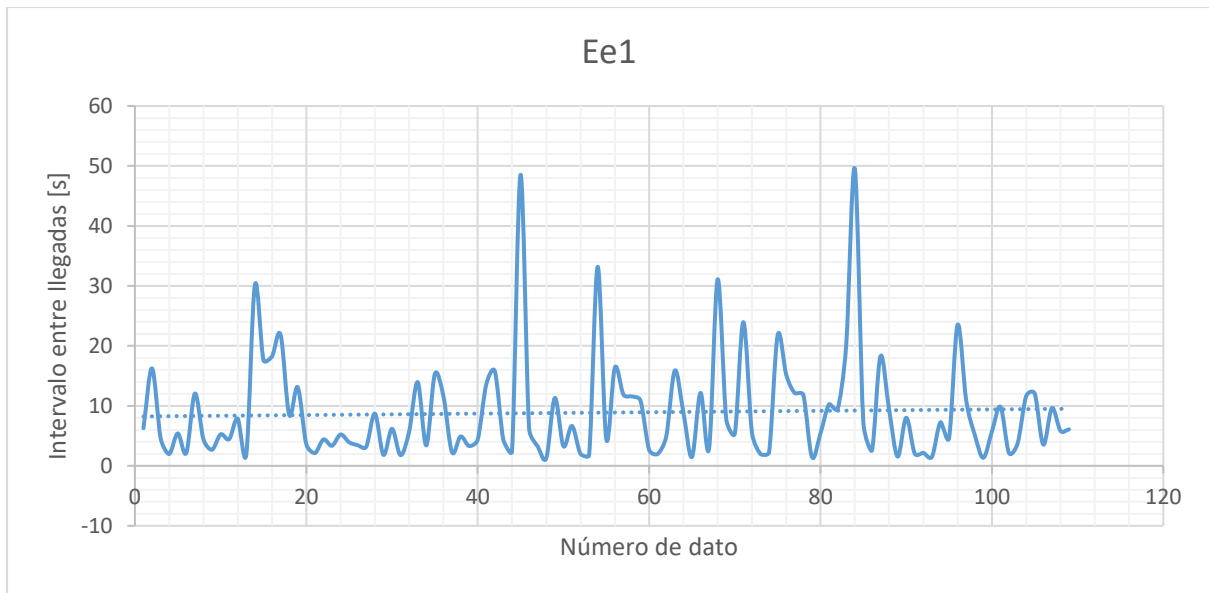


Fig. C.9. Estacionalidad de datos de Ee1.

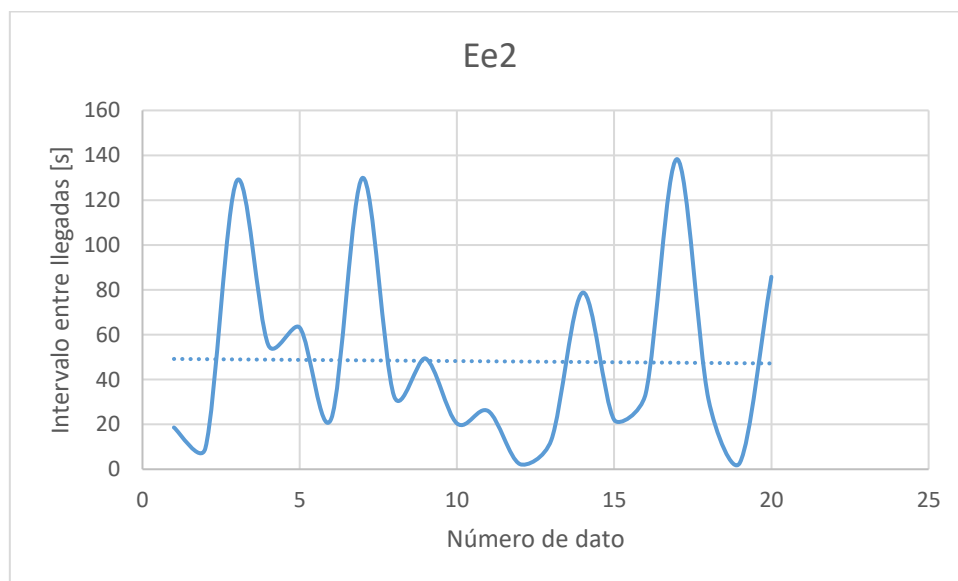


Fig. C.10. Estacionalidad de datos de Ee2.

### Test de independencia.

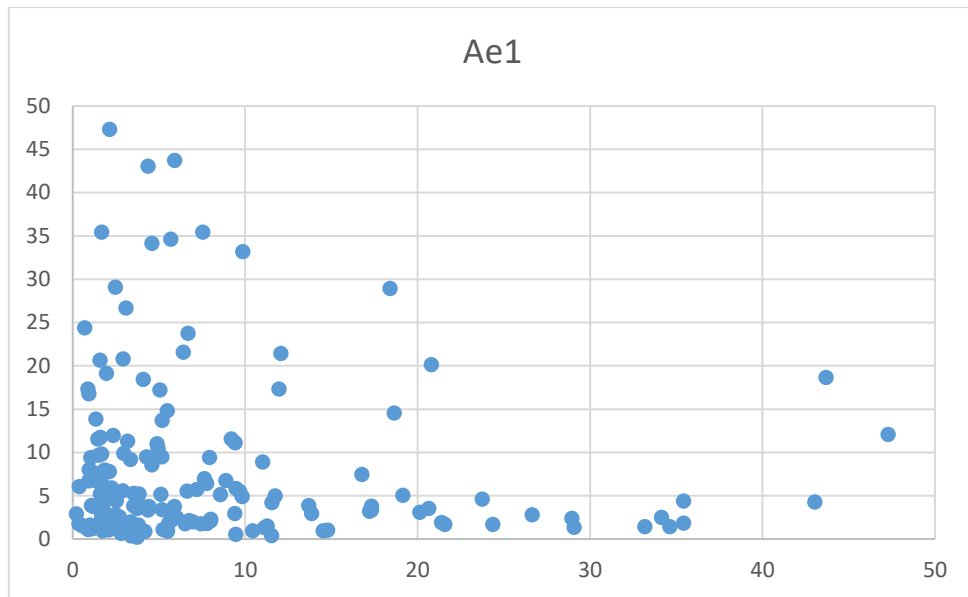


Fig. C.11. Gráfico de dispersión para datos de Ae1.

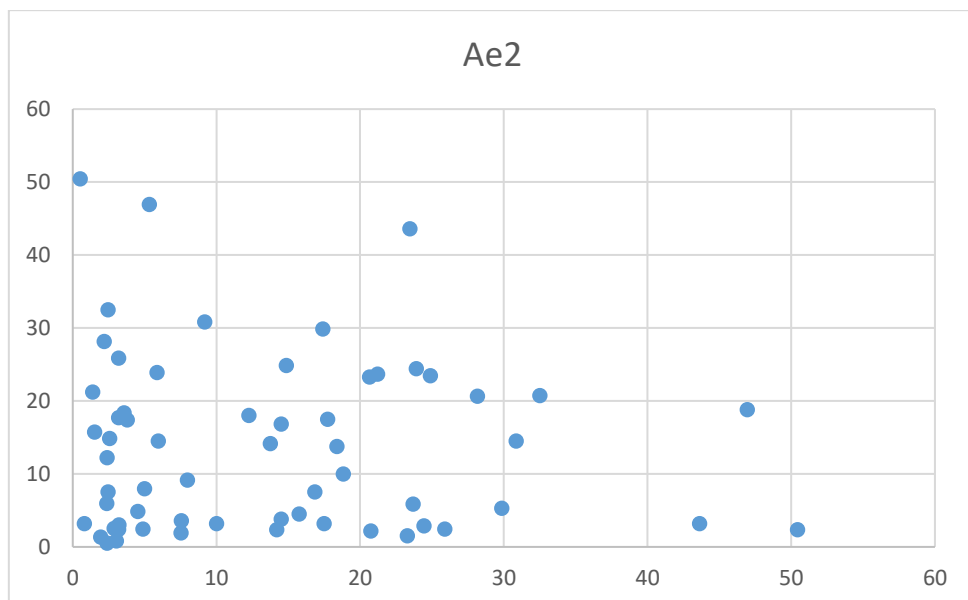


Fig. C.12. Gráfico de dispersión para datos de Ae2.

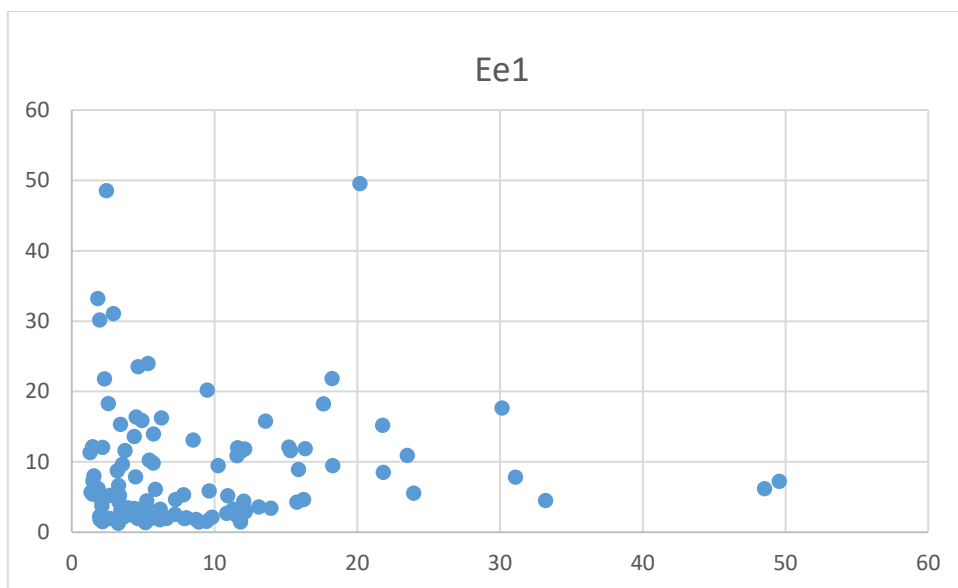


Fig. C.13. Gráfico de dispersión para datos de Ee1.

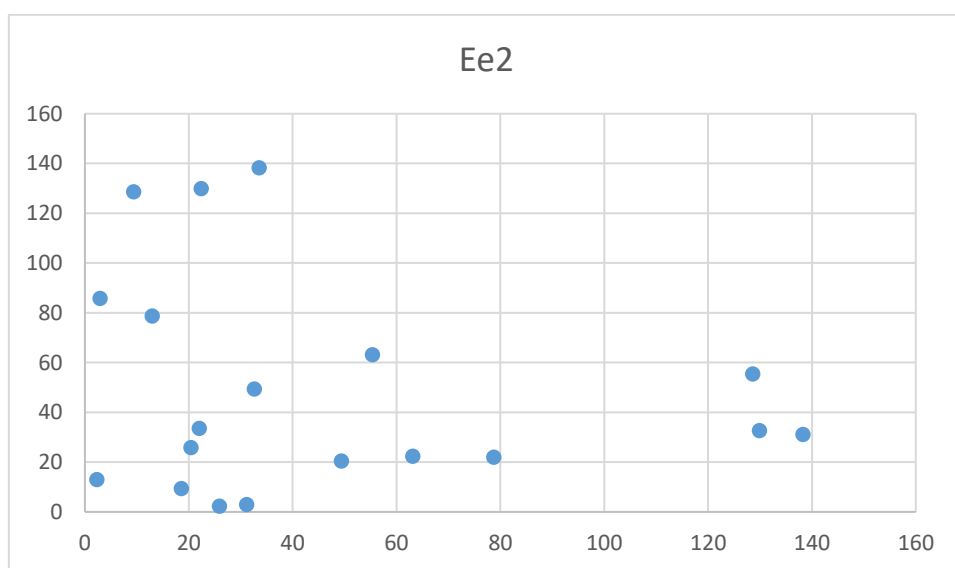


Fig. C.14. Gráfico de dispersión para datos de Ee2.



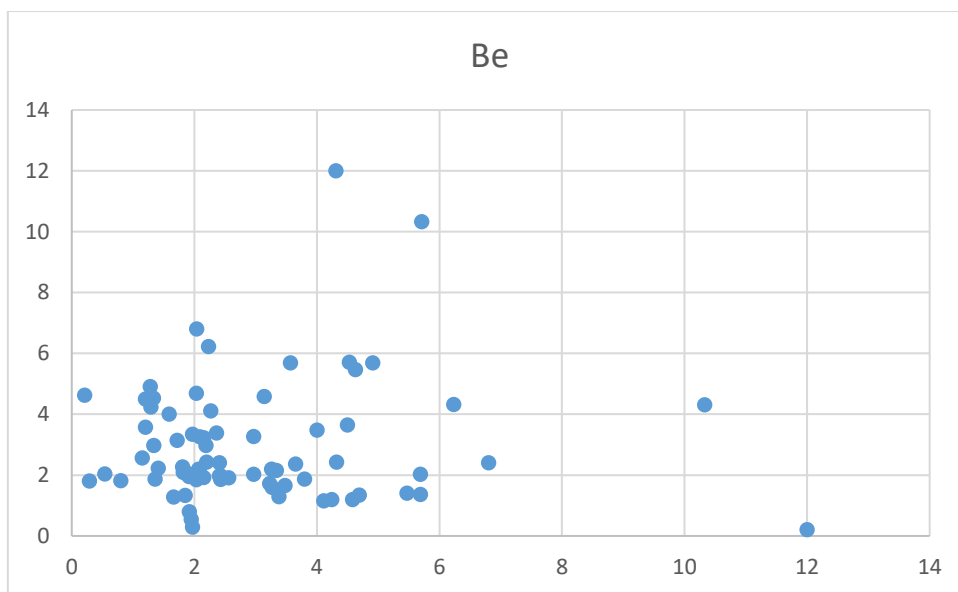


Fig. C.15. Gráfico de dispersión para datos de Be.

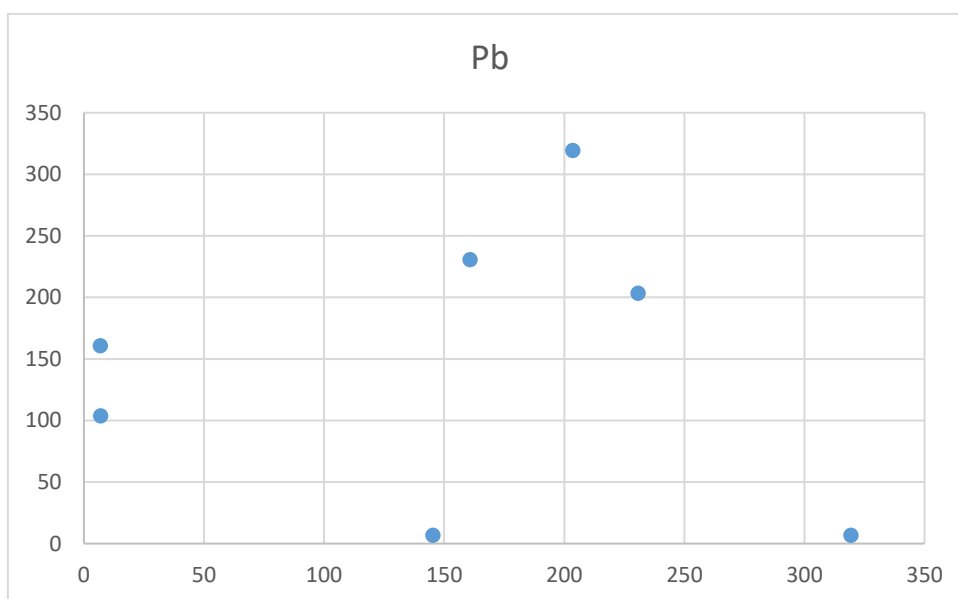


Fig. C.16. Gráfico de dispersión para datos de Pb.

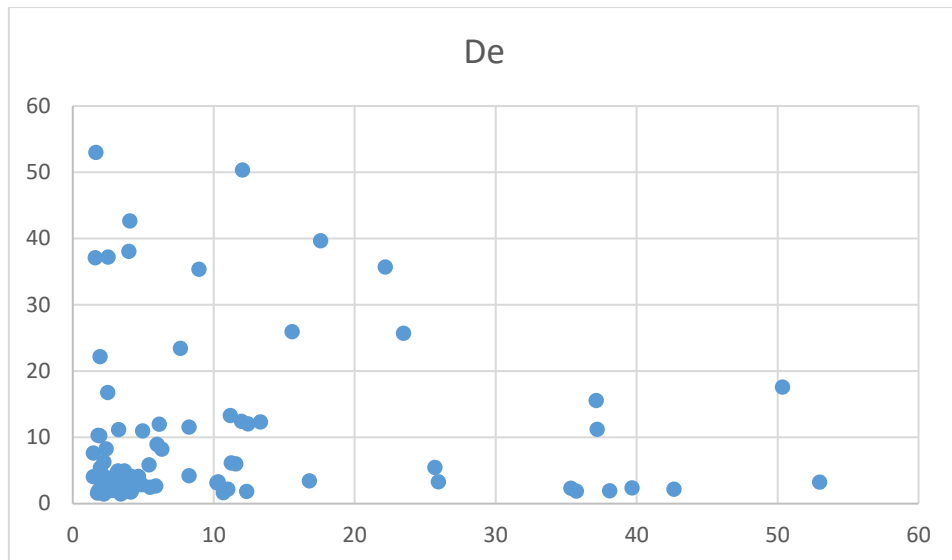


Fig. C.17. Gráfico de dispersión para datos de De.

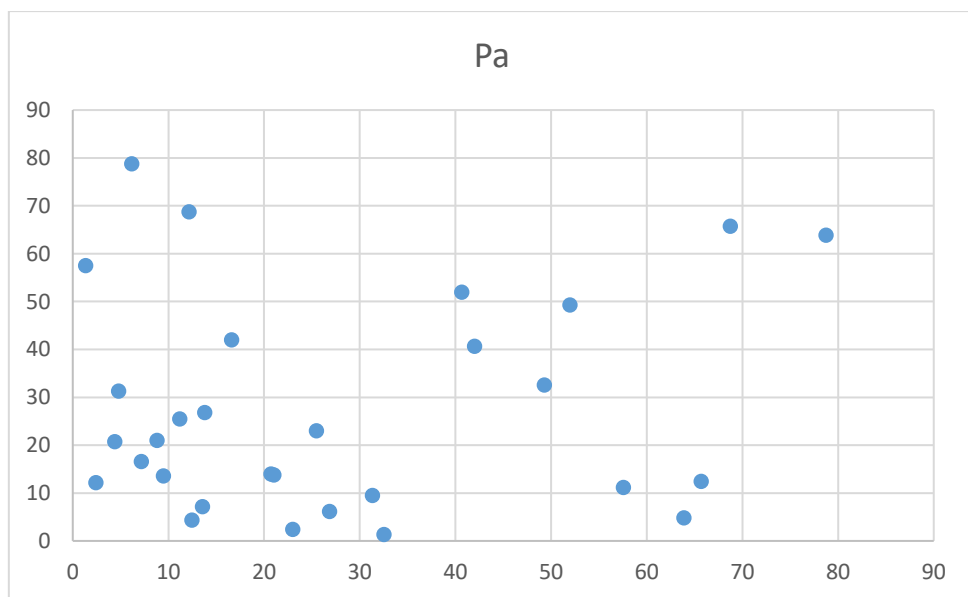


Fig. C.18. Gráfico de dispersión para datos de Pa.

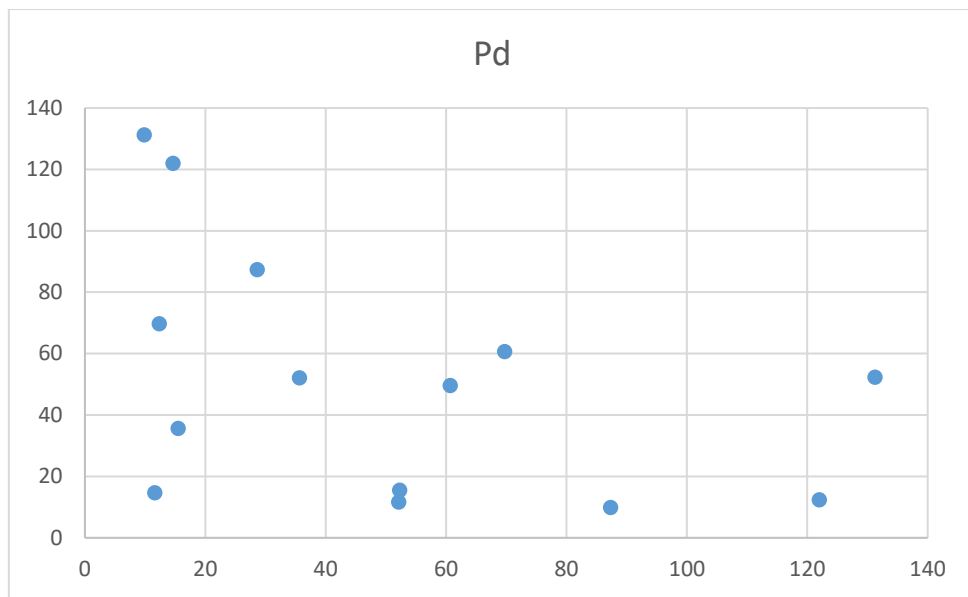


Fig. C.19. Gráfico de dispersión para datos de Pd.

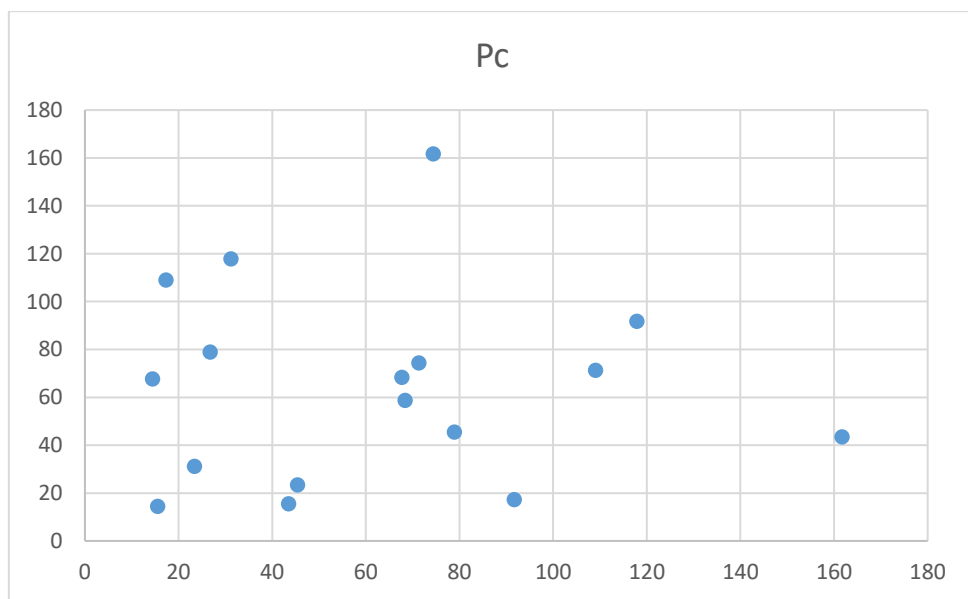


Fig. C.20. Gráfico de dispersión para datos de Pc.

## ANEXO D: Histogramas

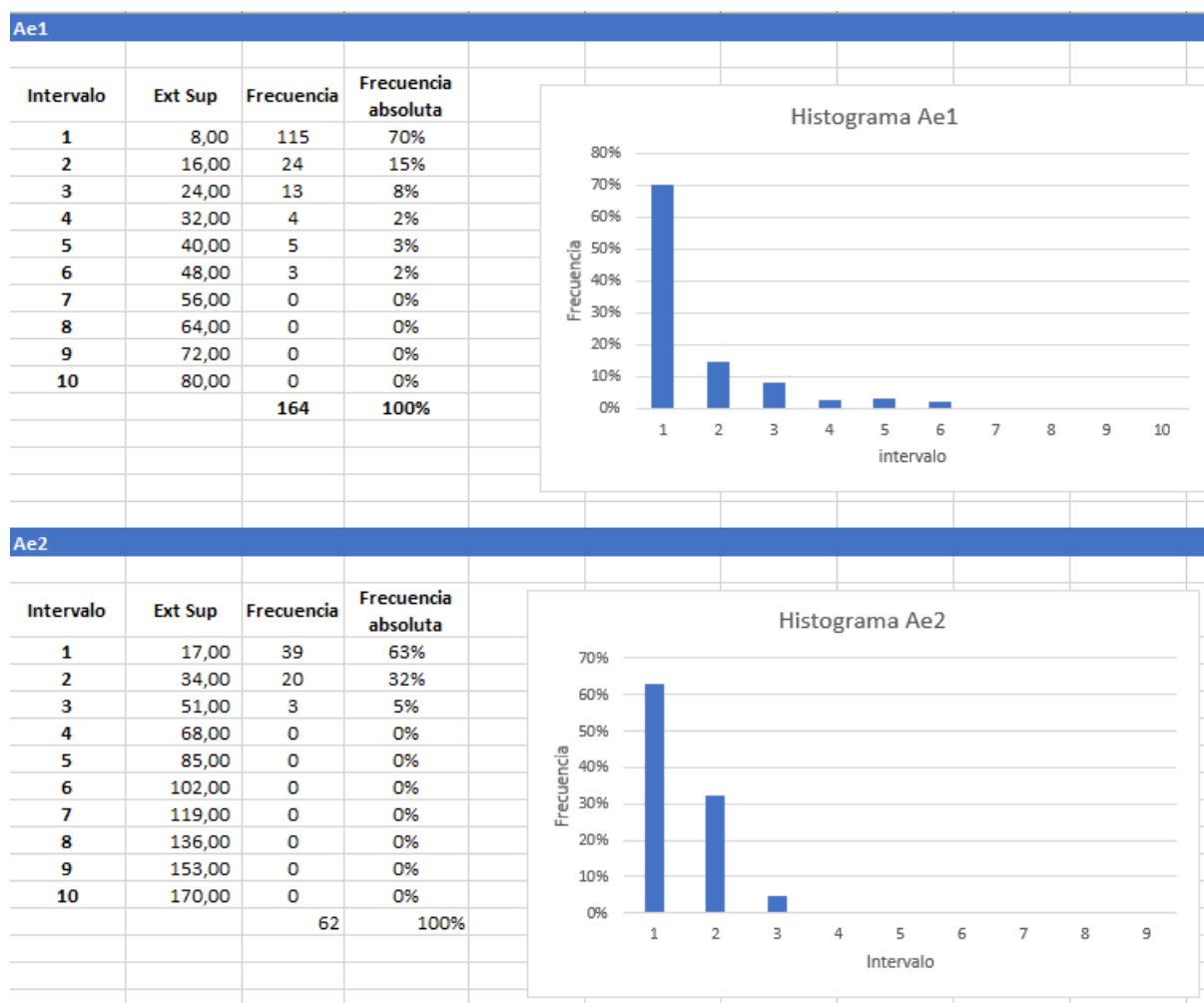


Fig. D.1. Histogramas de Ae1 y Ae2

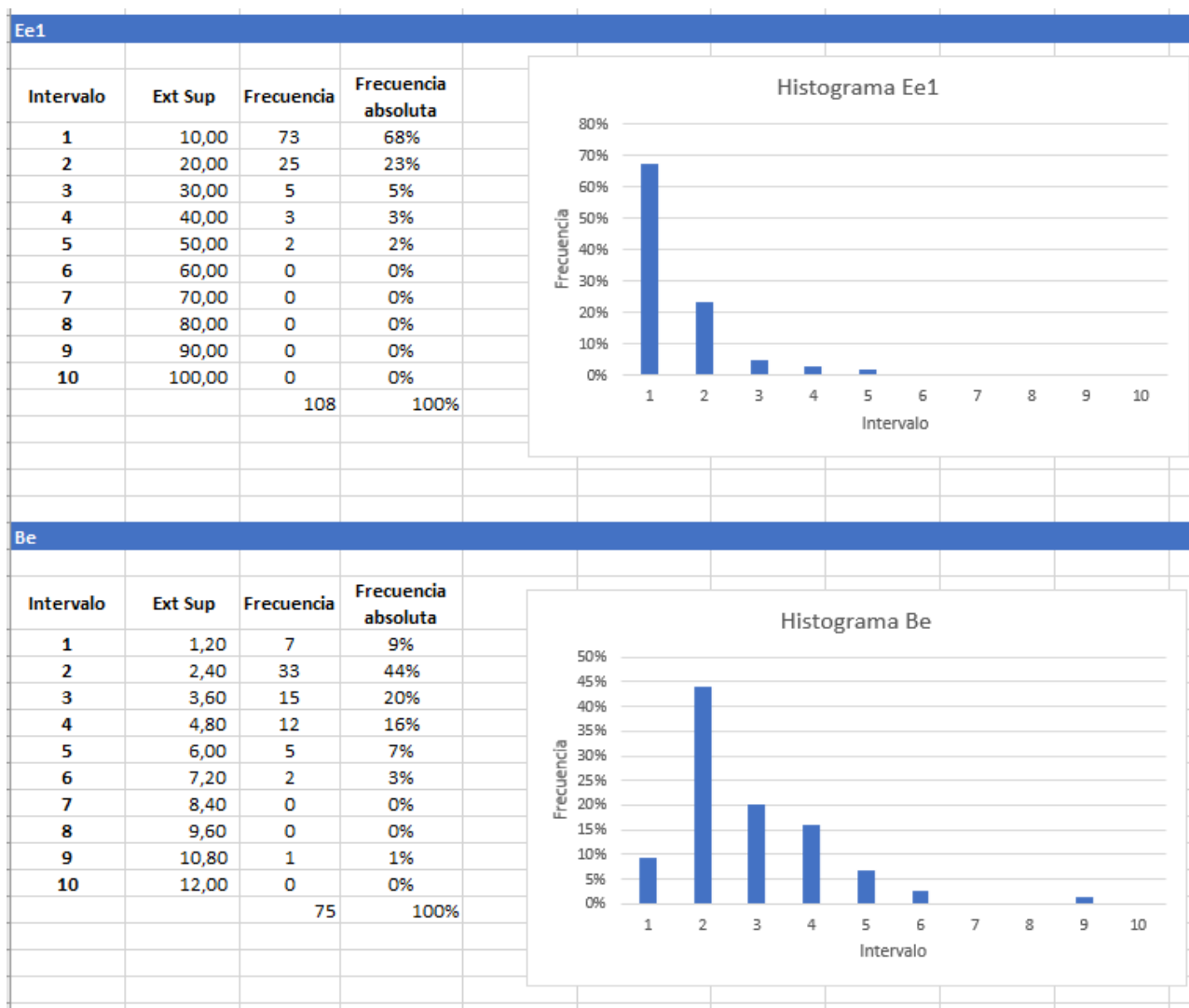


Fig. D.2. Histogramas de Ee1 y Be

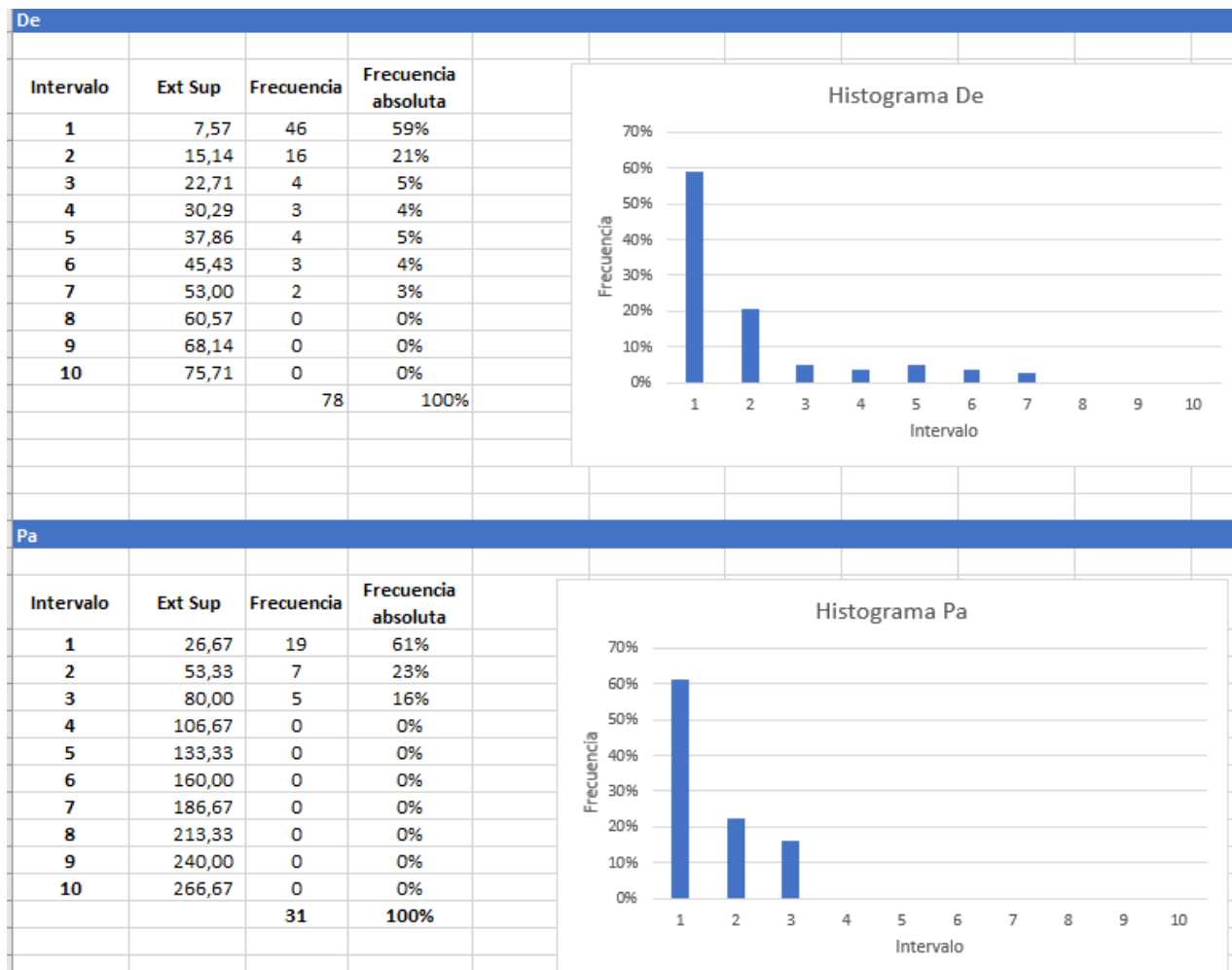


Fig. D.3. Histogramas de De y Pa.

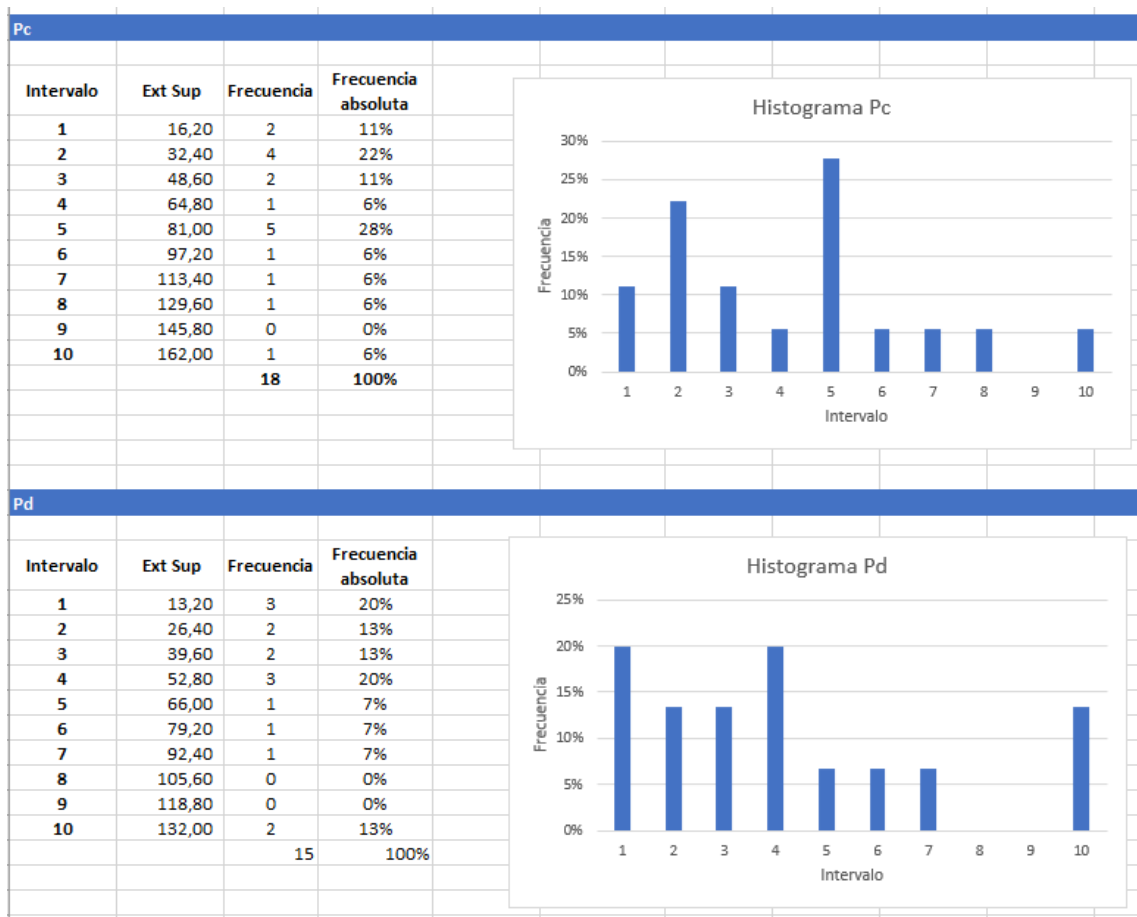


Fig. D.4. Histogramas de Pc y Pd.

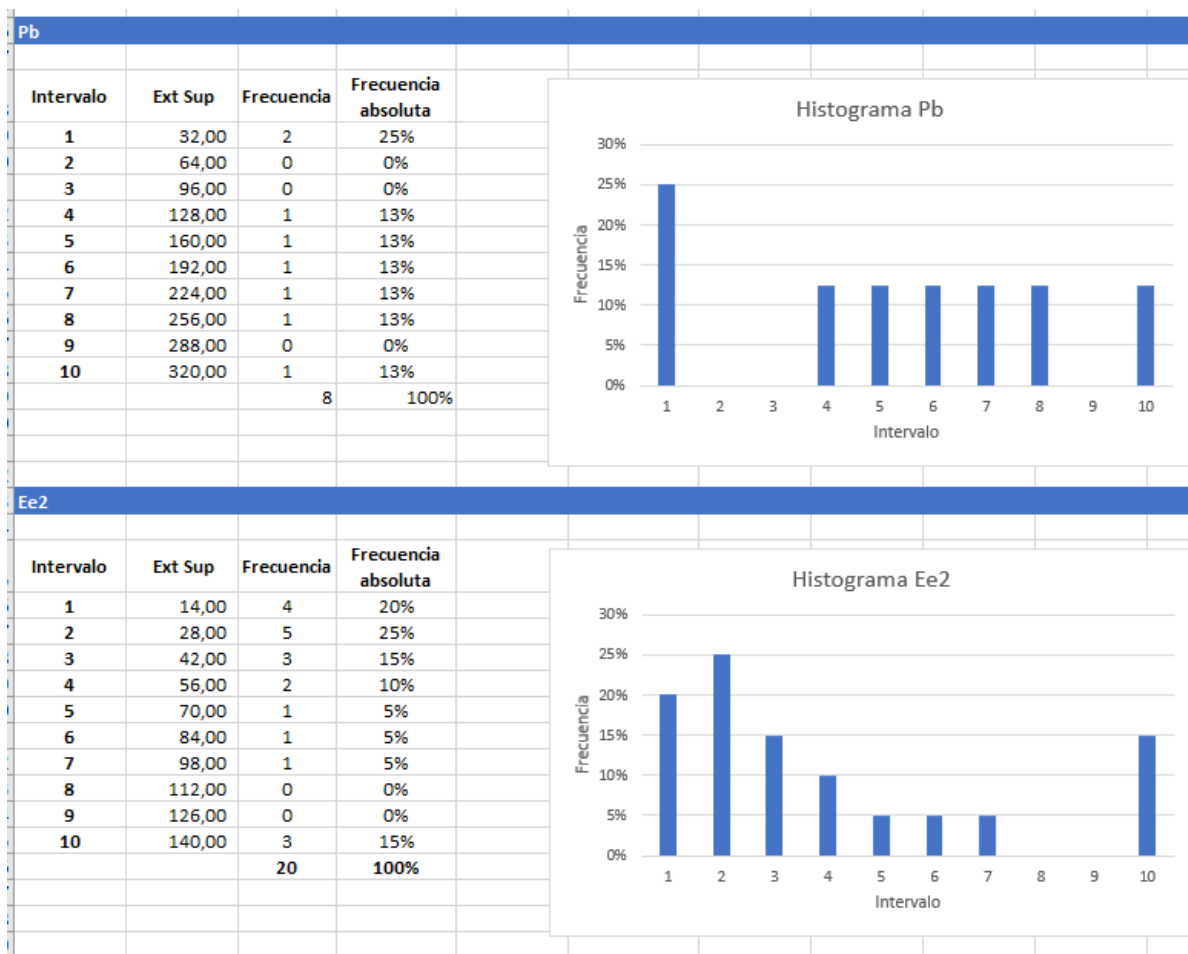


Fig. D.5. Histogramas de Pb y Ee2.



## ANEXO E: Test $\chi^2$

Ae1					
Hipótesis	Exponencial (7,97)				
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$			
	1	0,83972331	6	6,595121951	
	2	1,778454104	32	14,83902439	
	3	2,842699303	21	1,290243902	
	4	4,071280221	18	0,156097561	
	5	5,524383029	18	0,156097561	
	6	7,302837133	13	0,704878049	
	7	9,59566325	15	0,119512195	
	8	12,82722016	12	1,180487805	
	9	18,35160319	8	4,302439024	
	10	100000	21	1,290243902	
				30,63414634	CHI EXP
				16,9189776	CHI TEÓRICA
Hipótesis	Exponencial (7,97)				
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$			
	1	1,778454104	38	0,824390244	
	2	4,071280221	39	1,17195122	
	3	7,302837133	31	0,098780488	
	4	12,82722016	27	1,025609756	
	5	10000	29	0,440243902	
				3,56097561	CHI EXP
				9,487729037	CHI TEÓRICA

Fig. E.1. Test  $\chi^2$  de Ae1

Ae2					
Hipótesis	Exponencial (13,58)				
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$			
	1	5,506216168	24	0,537634409	
	2	14,91915488	13	2,844086022	
	3	100000	25	0,908602151	
				4,290322581	CHI EXP
				5,991464547	CHI TEÓRICA
Ee1					
Hipótesis	Exponencial (8,88)				
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$			
	1	1,981514736	14	2,790825688	
	2	4,536131539	29	2,377981651	
	3	8,136661699	24	0,222018349	
	4	14,29180866	23	0,066055046	
	5	10000	19	0,359633028	
				5,816513761	CHI EXP
				9,487729037	CHI TEÓRICA

Fig. E.2. Test  $\chi^2$  de Ae12 y Ee1

Be					
Hipótesis	Exponencial (2,98)				
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$			
	1	1,208286022	7	13,26754386	
	2	3,27386462	44	13,75438596	
	3	10000	25	0,004385965	
				27,02631579	CHI EXP
				5,991464547	CHI TEÓRICA
Hipótesis	Exponencial (2,98)				
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$			
	1	0,664967783	3	9,792105263	
	2	1,522260359	10	1,778947368	
	3	2,730546381	32	18,56842105	
	4	4,796124979	22	3,042105263	
	5	1000	9	2,528947368	
				35,71052632	CHI EXP
				9,487729037	CHI TEÓRICA

Fig. E.3. Test  $\chi^2$  de Be.

De				
Hipótesis	Exponencial (10,75)			
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$		
1	2,398793177	18	0,08534365	
2	5,491375455	24	0,151722045	
3	9,850125368	8	0,016858005	
4	17,30145756	14	0,05162764	
5	1000	14	0,05162764	
			0,357178981	CHI EXP
			9,487729037	CHI TEÓRICA
Pa				
Hipótesis	Exponencial (27,03)			
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$		
1	10,95972187	8	0,52688172	
2	29,69549016	12	0,268817204	
3	10000	11	0,043010753	
			0,838709677	CHI EXP
			5,991464547	CHI TEÓRICA

Fig. E.4. Test  $\chi^2$  de De y Pa.

Pc				
Hipótesis	Exponencial (62,08)			
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$		
1	25,17127391	4	0,666666667	
2	68,20185088	6	0	
3	1000	8	0,666666667	
			1,333333333	CHI EXP
			5,991464547	CHI TEÓRICA
Ee2				
Hipótesis	Exponencial (48,19)			
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta= $Nk(Nk-np)^2/np$		
1	19,53733623	5	0,416666667	
2	52,93663313	8	7,76344086	
3	10000	7	9,037634409	
			17,21774194	CHI EXP
			5,991464547	CHI TEÓRICA

Fig. E.5. Test  $\chi^2$  de Pc y Ee2.

Hipótesis	Weibull(1,635, 3,342)			
$\Sigma \ln(X_i)^2$	94,264	$\Sigma (X_i^\alpha) * \ln(X_i)$	821,380	
$\Sigma \ln(X_i)$	67,791	$\Sigma X_i^\alpha$	546,393	
$\alpha_0$	1,911			
$\alpha$ variable	1,635			
$(\Sigma X_i^\alpha * \ln(X_i) / \Sigma X_i^\alpha) - 1/\alpha$	0,892			
$\Sigma (\ln(X_i)) / n$	0,892			
$\beta$	3,342			

Fig. E.6. Test  $\chi^2$  de Be.

Hipótesis	Weibull(1,635, 3,342)			
	Be (prueba 1)	Be (prueba 2)	Be (prueba 3)	
Media	2,98	2,98	2,98	
Desviación típica	1,99	1,99	1,99	
# intervalos (k)	7	4	10	
Probabilidad intervalos (pk)	0,14	0,25	0,10	
# datos (n)	76	76	76	
n-pk	10,86	19,00	7,60	
alfa	0,05	0,05	0,05	
G.D.L (k-1)	6	3	9	
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta=	(Nk-np)*2/np	
	1	1,064880247	4	4,3308271
	2	1,716434986	11	0,0018797
	3	2,343011823	24	15,909774
	4	3,019643078	8	0,7518797
	5	3,835560902	10	0,0676692
	6	5,021156187	11	0,0018797
	7	10000	8	0,7518797
			76	21,815789
				CHIEXP
				12,591587
				CHI TEÓRICO
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta=	(Nk-np)*2/np	
	1	1,55966038	13	1,8947368
	2	2,670642562	32	8,8947368
	3	4,080674662	13	1,8947368
	4	1000	18	0,0526316
				12,736842
				7,8147279
Intervalo	Extremo superior	Frecuencia absoluta=	(Nk-np)*2/np	
	1	0,843761484	4	1,7052632
	2	1,335213948	6	0,3368421
	3	1,77881522	6	0,3368421
	4	2,21586718	21	23,626316
	5	2,670642562	8	0,0210526
	6	3,167736123	3	2,7842105
	7	3,743493301	8	0,0210526
	8	4,470709793	6	0,3368421
	9	5,565560033	7	0,0473684
	10	10000	7	0,0473684
				29,263158
				16,918978

Fig. E.7. Test  $\chi^2$  de Be.